



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Painelaitteiden laadunvarmistus

Antti Ruusila

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

Helmikuu 2021

TIIVISTELMÄ

Painelaitteiden laadunvarmistus

Antti Ruusila

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2021, 62 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Lassi-Pekka Keränen

Tämän työn tavoitteena on esittää lukijalle perustiedot painelaitteiden laadunvarmistuksesta, joiden pohjalta on mahdollista syventyä aiheeseen. Näiden perustietojen avulla lukija ymmärtää laadunvarmistuksen tarpeen, sille asetetut lainsäädännölliset vaatimukset ja sen menetelmien sovellutuskohdaiset normit. Hän osaa valita kohteelle oikean rikkomattoman aineenkoetusmenetelmän ja tarvittaessa suorittaa nestepaineekokeen turvallisesti.

Asiasanat: hitsaus, laadunvalvonta, laadunvarmistus, painelaitteet, rikkomaton aineenkoetus.

ABSTRACT

Quality Control of Pressure Equipment

Antti Ruusila

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2021, 62 pp.

Supervisor at the university: Lassi-Pekka Keränen

On the basis of this work, the reader will be provided with basic information on the quality control of pressure equipment facilitating deeper research into the subject as needed. With this information, the reader understands the need for quality control of pressure equipment, the legal requirements imposed on it and the application specific standards of its methods. The reader will be able to choose an appropriate non-destructive testing method for a given situation and perform a fluid pressure test safely.

Keywords: non-destructive testing, pressure equipment, quality control, welding, weld verification.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto	5
2 Hitsausvirheet ja hitsiluokka	7
2.1 Hitsausvirheet.....	7
2.1.1 Mittavirheet.....	7
2.1.2 Hitsin rakenteelliset epäkohdat.....	8
2.2 Hitsiluokka	9
3 Rikkomaton aineenkoetus	11
3.1 Silmämääräinen tarkastus.....	12
3.2 Radiografinen tarkastus.....	14
3.2.1 Radiografisen tarkastuksen toimintaperiaate	14
3.2.2 Radiografisen tarkastuksen suoritus	15
3.2.3 Röntgensäteilylähteet.....	16
3.2.4 Gammasäteilylähteet.....	17
3.2.5 Muut säteilylähteet.....	18
3.2.6 Radiografisen tarkastuksen etuja ja puutteita	19
3.3 Ultraäänitarkastus.....	20
3.3.1 Ultraäänitarkastuksen toimintaperiaate ja suoritus	20
3.3.2 Ultraäänitarkastuksen etuja ja puutteita.....	23
3.4 Tunkeumanestetarkastus	24
3.4.1 Tunkeumanestetarkastuksen toimintaperiaate	24
3.4.2 Tunkeumanestetarkastuksen suoritus	25
3.4.3 Tunkeumanestetarkastuksen etuja ja puutteita	26
3.5 Magneettijauhetarkastus.....	27
3.5.1 Magneettijauhetarkastuksen toimintaperiaate	27
3.5.2 Magneettijauhetarkastuksen suoritus.....	28
3.5.3 Magneettijauhetarkastuksen etuja ja puutteita.....	29
3.6 Pyörrevirtatarkastus.....	30
3.6.1 Pyörrevirtatarkastuksen toimintaperiaate	31
3.6.2 Pyörrevirtatarkastuksen suoritus.....	32
3.6.3 Pyörrevirtatarkastuksen etuja ja puutteita.....	32

4 Painelaitteiden standardointi	34
4.1 Painelaitedirektiivi	34
4.1.1 Hyvä konepajakäytäntö	36
4.1.2 PED-vaarallisuusluokka I	36
4.1.3 PED-vaarallisuusluokka II	38
4.1.4 PED-vaarallisuusluokka III	40
4.1.5 PED-vaarallisuusluokka IV	42
4.2 Ulkomaiset standardoinnit	44
5 Laippaliitokset ja painekoe	46
5.1 Laippaliitokset	46
5.1.1 Laippatyypit	46
5.1.2 Tiivistetyypit	49
5.2 Paineekoe	50
6 Tarkastusmenetelmän valinta	56
7 Yhteenveto	59
LÄHDELUETTELO	60

1 JOHDANTO

Painelaite on suunniteltu pitämään sisällään paineenalaista ainetta, joka pyrkii vapautumaan tavalla tai toisella. Tämä tekee niistä luonnostaan vaarallisia. Lisäksi painelaitteiden kuljettamat sisällöt ovat usein ihmisille haitallisia. Pienikin myrkyllisten tai tukahduttavien aineiden vuoto voi aiheuttaa ihmishenkien menetyksen. Kokonaan rikkoutuessa painelaite voi räjähtää katastrofaalisin seurauksin. Tästä syystä on kehitetty erityisiä laadunvarmistuksen toimenpiteitä, joita tulee painelaitteiden valmistuksessa noudattaa turvallisuuden takaamiseksi.

Tämän työn tarkoituksena on esittää lukijalle perustiedot painelaitteiden laadunvarmistuksesta. Tältä pohjalta on helppo perehtyä tarkemmin kiinnostavaan laadunvarmistuksen osa-alueeseen lähdekirjallisuuden kautta. Tavoitteena on, että näiden perustietojen avulla lukija ymmärtää laadunvarmistuksen tarpeen ja sille asetetut lainsäädännölliset vaatimukset. Lisäksi lukija saa yleiskatsauksen laadunvarmistuksen yleisiin ja sovellutuskohdaisiin normeihin. Hän osaa valita kohteelle oikean rikkomattoman aineenkoetusmenetelmän ja suorittaa tarvittaessa nestepainekokeen turvallisesti. Työssä keskitytään erityisesti teollisuusputkiston painelaitteisiin ja sen asennuksen haasteisiin.

Työssä käytetään direktiivin 2014/68/EU (PED) mukaista painelaitteiden määrittelyä sekä luokittelua. PED:in mukaan direktiiviä tulisi soveltaa painelaitteisiin, joiden suurin sallittu käyttöpaine on yli 0,5 bar. ”’Painelaitteella’ tarkoitetaan säiliöitä, putkistoja, varolaitteita ja paineenalaisia lisälaitteita, mukaan lukien tarvittaessa paineenalaisiin osiin kiinnitetyt osat, kuten laipat, yhteen, liittimet, kannattimet ja nostokorvakkeet”. (2014/68/EU, artikla 2 kohta 1)

Painelaitteiden laadunvarmistaminen riippuu suuresti siitä, missä valmistus tapahtuu. Tästä syystä tarkastelun kohteeksi rajataan pääasiassa teollisuusputkiasennuksessa esiintyvät painelaitteet. Massatuotantona valmistettavat painelaitteet, kuten yksittäiset laipat, eivät ole tässä työssä tärkeässä asemassa. Esitettävä laadunvarmistamisen menetelmiä kuitenkin hyödynnetään myös tällaisille tuotteille. Teräksisissä painelaiterakenteissa tärkeimmät liittostyyppit ovat ruuvi- sekä hitsausliitokset. Ruuviliitokset tarkastetaan yleensä vain silmämääräisesti ja painetestauksella, joten

keskitytään aluksi hitsattuihin liitoksiin ja palataan laippaliitoksiin painekokeen yhteydessä.

Jotta ymmärretään tarve hitsattujen liitoksien silmämääräistä tarkemmalle testaukselle, käsitellään ensin yleisimmät hitsausvirheet ja kuinka ne voidaan havaita. Kuvailaan myös useita rikkomattoman aineenkoetuksen menetelmiä ja annetaan yleiskatsaus niiden toimintaperiaatteista, hyödyistä ja haasteista. Työssä keskitytään paineastioihin, joita valmistetaan pienissä erissä tai ne ovat ainutlaatuisia rakenteita. Tästä syystä ei ole hyödyllistä tutkia ainetta rikkovia menetelmiä, vaikkakin painelaitteet voivat osittain tai huomattavalta osin koostua standardoiduista osista, joiden laadunvarmistus on toteutettu tällaisilla menetelmillä.

Työssä tutkitaan eurooppalaisen painelaitedirektiivin asettamia vaatimuksia painelaitteiden laadunvalvonnasta. Standardien käsittelyssä pyritään esittämään sisältö ymmärrettävästi ja vältetään uppoutumasta liian syvällisesti yksityiskohtiin. Lopuksi tarjotaan hyviä käytäntöjä ja ohjeita painelaitteiden laadunvalvonnan suorittamiseen. Tarkoituksena on luoda yleinen kehys, jota seuraamalla lukija saa perustiedot NDT-menetelmistä ja siitä mikä näistä soveltuisi omaan laadunvalvonnan kohteeseen.

2 HITS AUSVIRHEET JA HITSILUOKKA

Painelaitteita valmistaessa tärkein liitöntätapa on hitsaus. Putkistot, kattilat, tulistimet ja lähes kaikki paineenalaiset kokoonpanot toteutetaan hitsaamalla. Oikein toteutettu hitsiliitos ei vaadi minkäänlaista kunnossapitoa ja kestää koko laitteen elinkaaren ajan. Hitsiliitosten haittana on kuitenkin valmistuksessa ilmenevät hitsausvirheet. Näiden hyväksyttävään määrään ja laatuun otetaan kantaa hitsiluokan avulla. Tämä luokka määritetään tietylle hitsaussaumalle ennen valmistusta sovellusstandardin tai vastuullisen suunnittelijan toimesta. Mitä korkeampi hitsiluokka, sitä parempi hitsattu liitos vaaditaan.

2.1 Hitsausvirheet

Painelaitteiden hitsaus on haastavaa. Usein asennuspaikat ovat hankalia ja ahtaita, aikataulu on kiireinen sekä hitsaaja ei välttämättä ole se kuka valmistelee kohteen hitsauskuntoon. Näissä tilanteissa kokeneimmillekin hitsaajille tulee virheitä. Hitsausvirheet voidaan karkeasti jakaa kolmeen eri kategoriaan. Näistä kaksi kategoriaa esitellään seuraavaksi yleisimpine hitsausvirheineen. Kolmas kategoria, materiaali- virheet, jotka liittyvät hitsiaineen materiaaliominaisuuksiin, ei ole tämän työn kannalta olennainen. Materiaali- virheet estetään vaatimalla perusaineelle ja hitsiaineelle materiaalitodistus, joka takaa käytettävän aineen tarvittavat ominaisuudet. (Fenton 1968, s. 64)

2.1.1 Mittavirheet

Hitsin onnistuminen riippuu oleellisesti mittavaatimuksissa pysymisessä. Lisäksi hitsattaville rakenteille täytyy tehdä useasti esivalmisteluja, kuten esimerkiksi putkien hitsausrailon asianmukainen viistäminen. Nämä esivalmistelut täytyy tehdä tarkasti, jotta hitsi ei poikkea huomattavasti suunnitellusta. Tällaiset virheet ovat havaittavissa oikeanlaisilla mittavälineillä ja tarkalla silmämääräisellä tarkastelulla.

Puutteellisesta tuennasta tai liiallisesta lämmöntuonnista voi aiheutua tilanne, jossa kappaleeseen syntyneet jännitykset vääristävät rakenteen muotoa. Mittavirheiden minimoimiseksi on tärkeää valmistella hitsattavat kappaleet ohjeiden mukaisesti. Tässä epäonnistuminen mahdollistaa monien rakenteellisten epäkohtien muodostumisen hitsiin.

Nämä ovat yleensä havaittavissa valmistusvaiheessa, mutta lopullinen hitsi voi näyttää silmämääräisesti hyvältä, vaikka se olisi sisäisesti viallinen. Liian suuri tai pieni hitsi ei ole myöskään hyväksyttävä. Tällaisista hitsausvirheistä puhutaan yleensä termeillä: korkea kupu, vajaa kupu, korkea juurikupu, vajaa juuri. Nämä virheet voidaan havaita silmämääräisesti mitalla.

Hitsin profiililla on suuri vaikutus sen toimintaan, erityisesti väsymiskestävyyteen. Huomattavaa on myös, että yhdellä epäonnistuneella hitsipalolla voi olla merkittävä vaikutus monipalkohitsin kestoikään. Yhden palon hitseissä voidaan profiilin virhe huomata silmämääräisesti, kun taas monipalkohitseissä tarvitaan syvällisempää tarkastusta. Muodon vääristymisen lisäksi hitsatuissa rakenteissa täytyy usein ottaa huomioon materiaalin laajeneminen ja supistuminen. Rakenteet, jotka tarvitsevat tarkalleen oikean lopullisen mitan joudutaan lähes aina koneistamaan hitsauksen ja mahdollisen hehkutuksen jälkeen.

2.1.2 Hitsin rakenteelliset epäkohdat

Kaarihitsauksessa metallien sulaessa ja sekoittuessa yhteen hitsisaumaan muodostuu erilaisia epäjatkuvuuskohtia, jotka halutaan pitää mahdollisimman pieninä ja vähälukuisina. Tällaiset virheet eivät johdu hitsi- tai perusmateriaalin metallografisista muutoksista, vaan hitsin rakenteen vääristymisestä tai puutteista. Nämä virheet ovat usein havaittavissa vain silmämääräistä tarkemmalla tarkastelulla, kuten radiografisen tarkastuksen tai tunkeumanestetutkimuksen avulla.

Radiografisella tarkastuksella yleisimmin havaittava hitsausvirhe on huokonen (Kauppi 2019, s. 75). Nämä ovat hitsauksen aikana kemiallisten reaktioiden takia syntyviä kaasutaskuja tai tyhjiöitä. Huokokset johtuvat yleisimmin liian suuresta hitsausvirrasta ja kaarenpituudesta. Hitsisaumaan voi myös muodostua metallioksideja tai ei-metallista kiinteää ainetta, joka jää hitsimateriaaliin tai perusaineen sisälle. Tätä kutsutaan sulkeumaksi. Hitsin jähmettyessä tällaiset aineet yleensä nousevat matalamman tiheydensä ansiosta pinnalle, josta ne ovat yksinkertaista poistaa. Joissakin tapauksissa kuitenkin sulkeumat voivat päätyä hitsatun saumaan sisälle, jolloin ne vaikuttavat hitsin kestäväyyteen. Sulkeumat voidaan usein välttää hyvällä hitsattavien kappaleiden esivalmistelulla ja lämmöntuonnin minimoimisella hitsauksen aikana. Volframielektrodeja käyttävissä hitsausmenetelmissä, kuten TIG-hitsauksessa, on

mahdollista tämän elektrodimateriaalin siirtyminen hitsisulaan. Yleisimpiä havaittavia sulkeumia ovat kuona- ja volframisulkeumat.

Liitosvirhe tapahtuu, kun hitsiaine ja perusaine eivät sula yhteen täydellisesti. Toinen samanlainen hitsausvirhe on vajaa hitsautumissyvyys tai voimakkaasti vaihteleva tunkeuma. Molemmissa tapauksissa hitsiaine ja perusaine ovat sulaneet yhteen puutteellisesti. Reunahaava on hitsausvirhe, jossa hitsattaessa sauman viereinen perusmateriaali on sulanut jättäen pienemmän perusaineenpaksuuden. Reunahaava voi myös syntyä hitsin aloitus- tai lopetuskohtaan. Perusaineeseen tai hitsisaumaan on mahdollista hitsauksen aiheuttamien muodonmuutosten takia syntyä erilaisia halkeamia. Lopetuskohtiin syntyvät halkeamat voidaan usein sulattaa esimerkiksi uuden puikon aloituksella. Yleensä halkeamia syntyy vain karkeneviin materiaaleihin, kuten seostettuihin teräksiin.

Hitsauksessa sauman pinnalle usein muodostuu erilaisia virheitä, jotka eivät yleensä ole itsessään haitaksi hitsin kestävyydelle, vaan voivat kieliä liitoksen sisäisistä ongelmista. Esimerkiksi pintareiät yleensä kertovat hitsin rakenteessa piilevän huokosia tai sulkeumia. Pintavirheet voivat myös olla vaarattomia, kuten sytytysjäljet ja roiskeet. Tällaiset virheet tulisi kuitenkin poistaa, sillä ne voivat toimia alkupisteenä väsymismurtumalle tai muulle vauriolle. Lisäksi pintavirheet voivat estää suunnitellun pintakäsittelyn onnistumisen.

2.2 Hitsiluokka

Hitsiluokka määrittää tyypillisen valmistuksessa esiintyvän hitsausvirheen mitat. Hitsiluokka päätetään tietylle hitsille, ei tuotteelle. Tällöin hitsatussa rakenteessa voi olla useita eri luokan hitsausaumoja. Hitsit luokitellaan kolmeen eri luokkaan: B, C ja D. Näistä vaativin luokka on B (SFS-EN ISO 5817, kohta 1). Hitsausluokka määritetään teräkselle, nikkelille, titaanille ja näiden seoksien sulahitsaukselle standardissa *SFS-EN ISO 5817*. Alumiinin sekä alumiiniseosten kaarihitsauksen luokitusta käsitellään standardissa *SFS-EN ISO 10042* (SFS-EN ISO 10042, kohta 1).

Painelaitteiden laadunvarmistamisen näkökulmasta oleellisin osa hitsiluokituksesta on sen asettamat raja-arvot hitsausvirheille. Hitsiä tutkittaessa rikkomattoman aineenkoetusmenetelmän avulla vertaillaan löydöksiä hitsiluokituksen asettamiin raja-

arvoihin sovellutusstandardin mukaisesti. Tasaisen huokoisuuden tai muun hitsausvirheen ryhmittymiä tarkastellaan siten, että tarkastelualueen pinta-alasta saa olla tietty osuus hitsausvirhettä. Avataan hitsiluokan käsitettä esimerkin avulla.

Erään teräksisen päittäishitsin tarkastuksessa huomataan yksi pitkänomainen huokonen. Tämän huokosen halkaisija on 0,5 mm ja sen pituus on 2 mm. Hitsatusta saumasta tiedetään, että sen hitsiluokka on B sekä sen nimellispaksuus on 4 mm. Nyt voimme tarkastella standardin *SFS-EN ISO 5817* taulukosta 1 riviltä 2.6 päittäishitsin kohdasta, että huokosen halkaisija saa olla maksimissaan 0,2 kertainen nimellispaksuuteen verrattuna, mutta ei suurempi kuin 2 mm. Lisäksi huokosen pituus saa olla maksimissaan nimellispaksuus, mutta ei suurempi kuin 25 mm. Tällöin raja-arvot virheen mitoille olisivat halkaisijalle 0,8 mm ja pituudelle 4 mm. Hitsausvirhe on hyväksyttävä.

3 RIKKOMATON AINEENKOETUS

Todellisissa rakenteissa on aina virheitä ja siten on pystyttävä tarkastelemaan valmistettujen osien sisäisiä virheitä, paikallistaa niiden sijainti ja asema, määrittelemään niiden koko sekä ymmärtämään niiden merkitys koko rakenteen käyttövarmuudelle. Tähän pyritään rikkomattoman aineenkoetuksen avulla. (Tiainen ja Leinonen 1982, s. 57)

NDT (Non-Destructive Testing), eli rikkomaton aineenkoetus on tarkastustapa, joka ei aiheuta muutoksia tarkasteltavaan kappaleeseen. NDT-menetelmiä voidaan hyödyntää useassa tapauksessa, yksinkertaisista vianmäärittelyksistä aina suurta tarkkuutta vaativiin tutkimuksiin asti (Cartz 1995, esipuhe). Koska aineenkoetus on alati kehittyvä tekniikan osa-alue, on useita uusia ja vähemmän tunnettuja NDT-menetelmiä. Tällaisia menetelmiä voitaisiin käyttää muiden tarkastuksien tukena tai erityistilanteissa. Kuitenkaan näiden tarkastusmenetelmien toimintaa ja luotettavuutta ei voida taata. Tästä syystä näitä ei voida hyödyntää painelaitteiden laadunvalvontaan, jossa turvallisuusriskit ovat suuret.

NDT-tutkimuksia hyödynnetään hitsausseamojen lisäksi useissa erilaisissa käyttökohteissa, kuten levykappaleiden laminaatioilmiöiden tai valukappaleiden sisäisten valuvirheiden havaitsemiseen. Rikkomaton aineenkoetus on hyödyllinen myös valmistusprosessien häiriöttömyyden varmistamisessa. Ennen suuria, kalliita ja vaikeita työvaiheita voidaan varmistua materiaalin käytettävyydestä NDT-menetelmillä ja täten välttyä turhilta kustannuksilta. Rikkomatonta aineenkoetusta voidaan hyödyntää myös konediagnostisiin käyttötarkoituksiin, kuten määräaikaishuoltojen yhteydessä käytön aikana syntyneiden vikojen löytämiseksi ennen lopullista vaurioitumista. (Tiainen ja Leinonen 1982, s. 57)

Rikkomaton aineenkoetus on tarkasti standardoitua. Kaikilla käytetyillä menetelmillä on omat standardinsa ja yleisimmillä niitä voi olla useitakin. Tarkastusmenetelmissä on kuitenkin pääpiirteisesti samat työvaiheet: valmistelu, tarkastus ja dokumentaatio. Seuraavissa osioissa tutustutaan menetelmiin selvittämällä niiden toimintaperiaatteet, käyttökohteet sekä jokaisen menetelmän etuja ja puutteita.

Vuototestaus (LT = Leak Testing) on tarkastustapa, jossa jokin paineistettu väliaine, yleensä vesi tai inertti kaasu, virtaa materiaalin lävistävien vikojen kautta, paljastaen virheet visuaalisesti, akustisesti tai mekaanisesti. Eräänlainen vuototestaus,

hydrostaattinen painekoe on tärkeä osa painelaitteiden laadunvarmistusta. Siihen, sekä tyypellä suoritettavaan painekokeeseen palataan kohdassa 5.2 *Painekoe* ja täten näitä menetelmiä ei tämän laajemmin tarkastella tässä kappaleessa.

3.1 Silmämääräinen tarkastus

Aistinvarainen, visuaalinen- tai silmämääräinen tarkastus (VT = Visual testing) on yleisin ja vanhin rikkomattoman aineenkoetuksen menetelmä, vaikkakin sitä ei yleisesti pidetä NDT-menetelmänä. Aistinvaraisen tarkastuksen voidaan pitää sisältävän myös kuulohavaintoja kuten sointiin perustuvat eheyden tarkastusmenetelmät (Tiainen ja Leinonen 1982, s. 58). Menetelmän standardointi käsittelee kuitenkin ainoastaan näköhavaintoja.

Visuaalinen tarkastus voidaan jakaa ilman apuvälineitä ja niillä suoritettaviin menetelmiin. Molemmilla menetelmillä voidaan havaita ainoastaan pintaan saakka ulottuvia virheitä. Tällaisia ovat esimerkiksi hitsien juurivirheet, reunavirheet ja halkeamat. (Tiainen ja Leinonen 1982, s. 58)

Hitsisaumojen visuaaliseen tarkastamiseen on luotu standardi *SFS-EN ISO 17637*, jossa määritetään sulahitsiliitoksen silmämääräisen tarkastuksen kulku. Standardissa määritellään hyväksyttävät tarkastusolosuhteet suoraan tarkasteluun, eli ilman apuvälineitä toteutettuun tutkimukseen. Valaistusvoimakkuuden pinnalla on oltava vähintään 350 lx, suositeltava voimakkuus on 500 lx. Lisäksi tarkastuskohteen luoksepäästävyys on oltava sellainen, että tarkastusetäisyys saa olla maksimissaan 600 mm ja katselukulma ei saa olla pienempi kuin 30°. Jos nämä ehdot eivät toteudu, turvaudutaan epäsuoraan tarkastukseen apuvälinein, kuten esimerkiksi boroskoopin avulla. (SFS-EN ISO 17637:2016, kohta 4)

Hitsien tarkastus voidaan suorittaa ennen hitsausta, sen aikana tai sen jälkeen. Ennen hitsausta silmämääräisessä tarkastuksessa täytyy varmistua, että viistetty railo on hitsausohjeen mukainen, railo ja perusaine on puhdistettu ja tarvittavat pintakäsittelyt on suoritettu sovellutus- tai tuotestandardin mukaisesti. Lisäksi täytyy tarkastaa, että hitsattavat osat ovat sovitettu toisiinsa piirustusten ja ohjeiden mukaisesti. (SFS-EN ISO 17637:2016, kohta 6.1)

Hitsauksen aikana tarkastetaan, että jokainen palko on puhdistettu ennen seuraavan hitsausta. Palkojen täytyy sulaa yhteen. Hitsissä esiintyvät virheet täytyy raportoida siten, että ne voidaan korjata ennen kuin hitsausta jatketaan. Korjattaessa hitsiä täytyy juuri avata riittävän syvälle suhteessa alkuperäisen railon muotoon, jotta varmistutaan täydellisestä hitsiaineen poistosta määritellyllä tavalla. Hitsatun sauman täytyy täyttää alkuperäisen hitsausohjeen vaatimukset mahdollisten korjauksienkin jälkeen. (SFS-EN ISO 17637:2016, kohta 6.2)

Valmiin hitsin tarkastus täytyy suorittaa sovellutus-, tuotestandardin tai muun hyväksymisrajan vaatimusten mukaisesti. Lopullinen tarkastus on tehtävä mahdollisen lämpökäsittelyn jälkeen. Tarkastuksessa täytyy huomioida pääpiirteissään: Sauman puhdistus ja viimeistely, hitsin profiili ja mitat sekä hitsin juuri ja pinnat. (SFS-EN ISO 17637:2016, kohta 6.4)

Hitsisaumasta pitää poistaa kaikki kuona ilman hiontaa, jotta vältetään hitsausvirheiden peittäminen. Kohteessa ei saa esiintyä työkalujen painaumia tai hakkausjälkiä. Jos hitsi vaatii jälkikäsittelyä, sauma ei saa ylikuumeta, siihen ei saa jäädä hiomajälkiä eikä sen pinta saa jäädä epätasaiseksi. Sileäksi käsiteltävä piena- tai päittäishitsi täytyy yhtyä tasaisesti ilman liiallista hiontaa. (SFS-EN ISO 17637:2016, kohta 6.4.2)

Hitsin pinnan täytyy olla säännöllinen ja ulkonäöltään tyydyttävä. Levityслиikkeen muoto ja etenemä pitää olla tasainen. Viimeisen palon ja perusaineen etäisyys sekä palkojen sijainti täytyy mitata, jos näin vaaditaan hitsausohjeessa. Hitsin leveys tulee olla tasainen koko liitoksen mitalla ja sauman tulee täyttää työpiirustusten sekä hyväksymisrajojen vaatimukset. (SFS-EN ISO 17637:2016, kohta 6.4.3)

Näkyvät hitsin osat tulee tarkastaa siten, että hitsautumissyvyys, vajaa juuri, läpipalot, reunahaavat, halkeamat, huokoisuus ja sytytysjäljet eivät ylitä tarkoituksenmukaisia hyväksymisrajoja. Kaikki tilapäiset kiinnikkeet tulee olla poistettu ja kiinnityskohta tarkistaa, ettei se ole vahingoittunut. (SFS-EN ISO 17637:2016, kohta 6.4.4)

Hitsi voidaan korjata joko avaamalla se vain paikallisesti, tai kokonaan. Kaikki korjatut hitsit pitää tarkastaa uudelleen alkuperäisen hitsin vaatimusten mukaisesti (SFS-EN ISO 17637:2016, kohta 6.5). Tarkastuksesta laaditaan tavanomainen pöytäkirja, johon on hyvä ottaa kuvia mahdollisista epäkohdista. Taulukossa 1 esitetään silmämääräisen tarkastuksen etuja ja puutteita.

Taulukko 1. Silmämääräisen tarkastuksen etuja ja puutteita (Tiainen ja Leinonen 1982, s. 58–59).

Silmämääräisen tarkastuksen etuja	Silmämääräisen tarkastuksen puutteita
Erittäin halpa ja nopea testausmenetelmä.	Suorittamien vaatii kokemusta.
Voidaan suorittaa monen tuotantoprosessin yhteydessä.	Tulokset ovat subjektiivisia ja inhimillisten virheiden riski on suuri.
	Menetelmällä ei ole mahdollista havaita mikroskooppisia virheitä.
	Vain pintaan avautuville vioille.
	Virheiden luokittelu on vaikeaa.

3.2 Radiografinen tarkastus

Radiografinen tarkastus (RT = Radiographic testing) on käytetyin NDT-menetelmä painelaitteiden hitsien tarkastuksessa. Radiografinen tarkastus toimii siten, että säteilyn lähde, yleensä röntgen- tai gammasäteilylähde kohdistetaan tarkastettavaan kappaleeseen. Tämän jälkeen kappaleen taakse asetetaan kohteen läpi kulkeneen säteilyn indikaattori eli filmi, johon säteily valottaa varjokuvan. Tarkasteltavan kappaleen maksimipaksuus riippuu käytetyn säteilyn läpäisykyvystä kappaleen materiaalissa. (Tiainen ja Leinonen 1982, s. 73)

Radiografinen tarkastus aiheuttaa huomattavan säteilyriskin tarkastuksen suorittajille ja ympäristölle, jos kaikkia turvallisuusmääräyksiä ei noudateta. Standardissa *SFS-EN ISO 17636-1* määritellään, että tarkastuksen suorittavan henkilön täytyy olla pätevyity sopivalle tasolle ja asianmukaiselle teollisuussektorille standardin *ISO 9712* tai vastaavan mukaan. (SFS-EN ISO 17636-1, kohta 6.10)

3.2.1 Radiografisen tarkastuksen toimintaperiaate

Varjokuva kiinteästä kappaleesta muodostetaan käyttämällä materiaaliin tunkeutuvaa säteilyä, yleensä röntgen- tai gammasäteilyä. Kuva muodostuu projektiona, joten siitä ei voi päätellä muotojen syvyyttä. Kuvan kontrasti syntyy eriasteisesta säteilyn imeytymismäärästä, joka voi johtua materiaalin tihentymistä, paksuudesta, epäkohdista tai kemiallisen koostumuksen muutoksista. Säteilyn täytyy päästä tunkeutumaan kokonaan kuvattavan kappaleen läpi. Radiografisessa tutkimuksessa on välttämätöntä päästä tarkasteltavan näytteen molemmille puolille, jotta filmi voidaan asentaa.

3.2.2 Radiografisen tarkastuksen suoritus

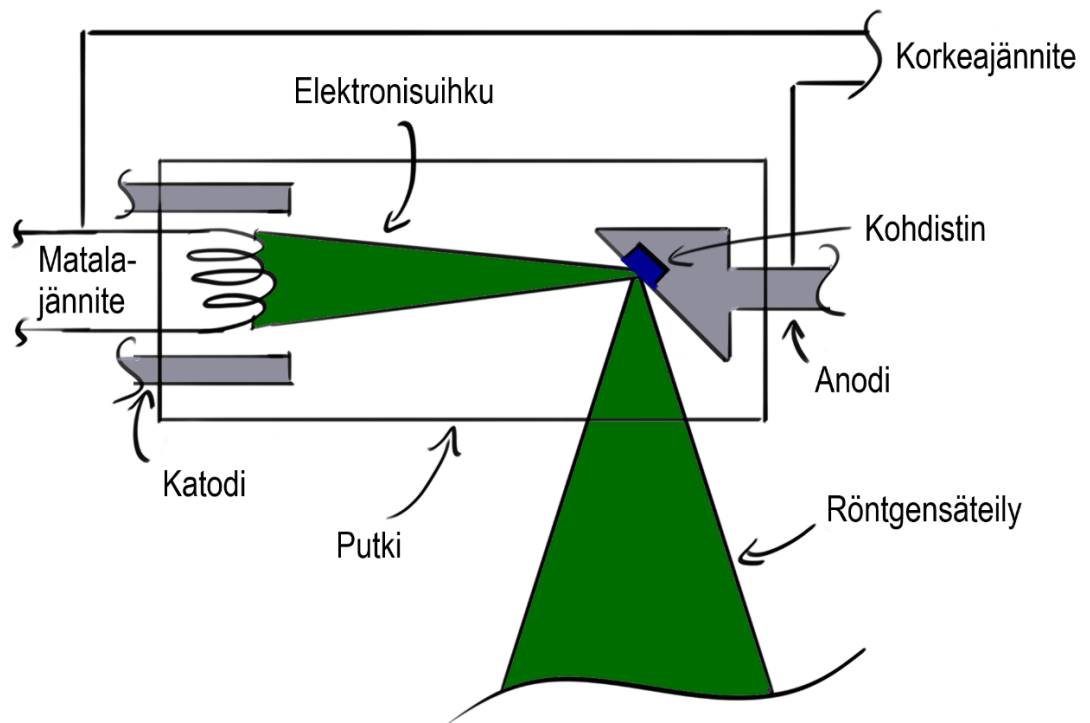
SFS-EN ISO 17636-1 mukainen hitsausseaman tarkistus toteutetaan pääpiirteisesti samalla tavalla kaikilla säteilylähteillä. Yksinkertaisuudessaan huomioidaan tarkistettavan alueen geometria siten, että kuvantaminen onnistuu mahdollisimman vähällä säteilyllä ja valitaan asianmukainen standardissa esitetty kuvaustapa. Tarkastettavan kappaleen kokonaispaksuuden mukaan valitaan sopiva säteilylähde. Jos kuvattava kappale on vaikeasti käsiteltävä tai huonosti luoksepäästävissä paikassa, voidaan röntgenkuvantaminen korvata gammakuvantamisella, jolloin laitteisto on huomattavasti pienikokoisempi. Säteilylähteen valinnan ja kohdistamisen jälkeen testikappaleeseen kiinnitetään teräksestä valmistettu kuvalaadun ilmaisin eli IQI (image quality indicator), jonka tyyppi määritetään standardissa *ISO 19232-1* tai *-2*. Ennen kuvausta pitää suorittaa standardin mukaiset suojaustoimenpiteet ja varmistua siitä, ettei kukaan pääse vahingossakaan altistumaan säteilylle. Nyt kuvantaminen voidaan aloittaa. Standardissa esitettyä valotusaikaa on tärkeää noudattaa, jotta saavutetaan hyväksyttävä kuva. Tämän jälkeen filmi on valmis kehitettäväksi. (*SFS-EN ISO 17636-1*, kohta 7.1)

Filmi kehitetään filmi- ja kemikaalivalmistajan suositusten mukaan. Kehitystä tulee valvoa standardin *ISO 11699-2* mukaan. Kuvia tulisi tarkastella hämärässä katselulaitteella, jonka luminanssia voidaan säätää standardin *ISO 5580* mukaisesti. (*SFS-EN ISO 17636-1*, kohta 7.9)

Radiografisen tarkastuksen vahvuuksia on sen tuloksena saatu pöytäkirja, jonka pohjalta voi usea asiantuntija tarkastella kohteen laatua. Verrattuna muihin NDT-menetelmiin, radiografisen tarkastuksen pöytäkirjaa tulkittaessa ei ole välttämätöntä saada taustatietoa kohteesta tai sen historiasta. Tutkimuksen kuvia pidetään yksiselitteisenä ja kattavina. Esimerkkinä ultraäänitarkastuksen tuloksena saatu pöytäkirja voi olla haastava saattaa niin kattavaksi, että täysin tuntematonta kohdetta voitaisiin arvostella ainoastaan pöytäkirjan perusteella luotettavin tulkinnoin. Pöytäkirja on varmuus, niin tuotteen valmistajallekin, että tuote on tosiaan valmistettu vaatimusten mukaisesti. Suuremmissa teollisuushankkeissa tarkasteltavien kohteiden paljouden takia yleensä tyydytään johonkin tiettyyn osuuteen tuotteista, jotka tarkastetaan. Pöytäkirjassa tulee olla standardin vaatimat tiedot, kuten mm. kuvauksen suorittaneen yrityksen nimi, perus- ja lisäaineen materiaali, aineenpaksuus sekä hitsausprosessi. Näillä tiedoilla voidaan varmistua kyseisen hitsiseaman laadusta ja esittää hitsauksen suorittaneen henkilön pätevyys vastaaville saumoille sopimuksen mukaisesti. (*SFS-EN ISO 17636-1*, kohta 8)

3.2.3 Röntgensäteilylähteet

Röntgensäteilyä muodostetaan röntgenputkella, josta esitetään kuvassa 1 periaatekuva. Yksinkertaistettu röntgenputki muodostuu katodina toimivasta hehkulangasta ja anodina toimivasta kohdistimesta, jotka ovat suljettu tyhjiöputkeen. Putkeen johdettu matalajännite lämmittää hehkulangan, jolloin se alkaa säteilemään elektroneja. Nämä elektronit kiihdytetään korkeajännitteellä kohdistimeen. Tyypillisten röntgenputkien polttopiste on kokoa $4 \text{ mm}^2 - 10 \text{ mm}^2$. Usein käytetään myös ns. 'minifocus' röntgenputkia, joiden polttopiste on kokoa $0,04 \text{ mm}^2 - 0,64 \text{ mm}^2$. (ASM Handbook Committee 2001, s. 302)



Kuva 1. Röntgenputken hahmotelma (mukaillen ASM Handbook Committee 2001, s. 302).

Matalan kiihdytyspotentiaalin röntgensäteily on painelaitteiden laadunvarmistuksessa useimmiten riittävää, sillä ainevahvuudet ovat harvoin suurempia kuin mihin tällaiset laitteet kykenevät. Taulukossa 2 on lueteltu ainepaksuuksien alueita mihin tyypillisillä röntgenputkien jännitteillä, eli kiihdytyspotentiaaleilla päästään.

Taulukko 2. Tyypillisiä röntgenputkien kiihdytyspotentiaaleja ja näillä tarkasteltavien ainevahvuuksien alueita teräksessä (mukaiillen ASM Handbook Committee 2001, s. 307).

Maksimi kiihdytyspotentiaali (kV)	Tarkasteltava ainepaksuus teräksessä (mm)
150	0–15
250	0–40
400	0–65
1000	5–90

NDT-testausta koskeissa standardeissa on määritetty röntgensäteilylähteille maksimijännitearvoja hyvän erottelutarkkuuden takaamiseksi. Standardissa *SFS-EN ISO 17636-1* löytyvästä kuvaajasta voidaan poimia maksimijännitteitä tyypillisille ainepaksuuksille, jotka ovat esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Viitatus standardin sallimia maksimijännitteitä röntgenputkille 1000 kV asti tyypillisin ainevahvuuksin teräksessä, tarkastelutaso A (mukaiillen SFS-EN ISO 17636-1, kohta 7.2.1).

Tarkasteltava ainepaksuus (mm)	Maksimijännite kuvaajasta (kV)
2	120
5	140
10	185
20	290

3.2.4 Gammasäteilylähteet

Gammasäteilyä muodostuu radioaktiivisen isotoopin hajonnassa. Rikkomattomassa aineenkoetuksessa käytetään yleensä isotooppeja iridium-192 tai koboltti-60. Yhtälössä 1 on esimerkkinä Co 60 beetahajoaminen:



Beetahajoamisen tuloksena vapautuu energiaa aluksi 1,17 MeV ja edelleen 1,33 MeV gammasäteilyn muodossa. Tätä energiaa hyödynnetään kuvantamisessa. Taulukossa 4 esitetään yleisiä gammasäteilynlähteitä ja niiden läpäisyvyvyksiä teräksessä American Society of Metals, ASM:n mukaan. Standardissa *SFS-EN ISO 17636-1* mainitaan myös

kokonaispaksuusalueet teräkselle näille esitetyille säteilylähteille. Näiden alueiden voidaan huomata olevan hieman suuremmat kuin ASM:n esittämät arvot.

Taulukko 4. Yleisiä gammasäteilynlähteitä ja niiden läpäisyisyvyys teräksessä (mukaillen ASM Handbook Committee 2001, s. 308).

Gammasäteilynlähde (isotooppi)	Läpäisyisyvyys teräksessä (mm)
Tulium-170	13
Iridium-192	75
Cesium-137	75
Koboltti-60	230

Gammasäteilyllä tuotetut kuvat ovat radiografiassa kuvalaadultaan huonompia verrattuna röntgensäteillä tuotettuihin, mutta säteilynlähteiden fyysinen koko on huomattavasti pienempi ja täten mahdollistaa gammakuvantamisen hyödyntämisen ahtaammissa ja vaikeammin päästävissä kohteissa.

3.2.5 Muut säteilylähteet

Muita vähemmän käytettyjä säteilylähteitä ovat hiukkaskiihdyttimet, jotka toimivat usealla eri toimintaperiaatteella. Näitä käytetään kuitenkin vain erityistapauksissa, jos halutaan kuvata suurempia aineenpaksuuksia kuin röntgen- ja gammakuvantaminen mahdollistavat. Tavanomaiset hiukkaskiihdyttimet ovat suuria ja vaikeasti liikuteltavia laitteita, vaikkakin on kehitetty myös kannettavia järjestelmiä.

Kiihdyttimillä voidaan tarkastella huomattavan suuria, jopa 610 mm kokonaispaksuuksia teräksessä (ASM Handbook Committee 2001, s. 307). Taulukossa 5 esitetään standardin *SFS-EN ISO 17636-1* mukaisia kokonaispaksuusalueita kiihdyttimien energioiden suhteen.

Taulukko 5. Viitatus standardin mukaisia kokonaispaksuusalueita kiihdyttimien energioiden suhteen tarkastelutasolla A (mukaillen SFS-EN ISO 17636-1, kohta 7.2.2).

Kiihdyttimen energia (MeV)	Kokonaispaksuusalue (mm)
1–4	30–200
4–12	>50
>12	>80

3.2.6 Radiografisen tarkastuksen etuja ja puutteita

Radiografinen tarkastus on yleisimmin käytetty volymetrinen tarkastusmenetelmä, eli menetelmä, jolla voidaan havaita sisäisiä materiaaliveikkoja. Menetelmän turvallisuusriskien ja laitteiston korkeiden käyttökustannuksien takia sen käyttö on vähentynyt, mutta saman tasoisten tuloksien saavuttaminen vaihtoehtoisilla menetelmillä on haasteellista. Taulukossa 6 esitetään radiografisen tarkastuksen etuja ja puutteita.

Taulukko 6. Radiografisen tarkastuksen etuja ja puutteita (ASM Handbook Committee 2001, s. 295–302; Tiainen ja Leinonen 1982, s.76–77; Åström 1990, s. 59–61).

Radiografisen tarkastuksen etuja	Radiografisen tarkastuksen puutteita
Hitseissä esiintyvät epäjatkuvuuskohdat näkyvät selkeästi filmillä.	Laitteiston suuri koko.
Virhetyypit voidaan tunnistaa helposti mustuman laadusta.	Tarkastuksessa täytyy olla pääsy kohteen molemmille puolille.
Tarkastuksesta jää pysyvä dokumentti.	Ilmaisumedia, filmi, ei toimi hyvin monimutkaisille geometrioille.
Kolmiulotteiset viat näkyvät hyvin.	Käytetty säteily on ihmisille haitallista.
Toimii kaikille materiaaleille.	Laitteistot ovat luvanvaraisia ja kalliita.
Kuvanto vastaa geometrialtaan virhettä, joka helpottaa tulkintaa.	Kaksiulotteisten vikojen havaitseminen lähes mahdotonta. Esimerkiksi halkeamat.
Yleisesti hyväksytty menetelmä.	Menetelmällä ei voida tarkastella vian syvyys sijaintia.
Hyvät koulutusmahdollisuudet.	Vaatii kokeneen kuvaajan
	Viat havaittavia vain, jos materiaalien absorptioero on 1 % luokkaa.

3.3 Ultraäänitarkastus

Ultraäänitarkastus (UT = Ultrasonic Testing) on yksi käytetyimmistä NDT-menetelmistä radiografian jälkeen. Tarkastuksessa koekappaleeseen tuodaan lähettimellä ultraääntä pulsseina tai jatkuvana värähtelynä. Nämä ultraääniaallot heijastuvat materiaalin epäjatkumista tai läpäisevät kappaleen. Läpimenevät ja heijastuneet ääniaallot vastaanotetaan luotaimella, joka voi olla erillinen laite tai sisäänrakennettu lähettimeen. Molemmissa tekniikoissa voidaan käyttää tai olla käyttämättä heijastuksia yhdestä tai useammasta kohteen pinnasta.

Ultraäänitarkastus on painelaitteiden laadunvarmistuksessa harvinaisempi, koska ohuiden seinämien tarkastaminen on menetelmällä ongelmallista pintojen läheisyyden takia. Säiliöiden ja putkien aineenvahvuudet ovat harvoin niin paksuja, että ultraäänellä saataisiin radiografiseen tutkimukseen verrattavissa olevia tuloksia. Lisäksi useat materiaalit, kuten austeniittinen teräs, nikkeli, kupari ja titaani aiheuttavat ultraäänen sirontaa, edelleen heikentäen tuloksien laatua.

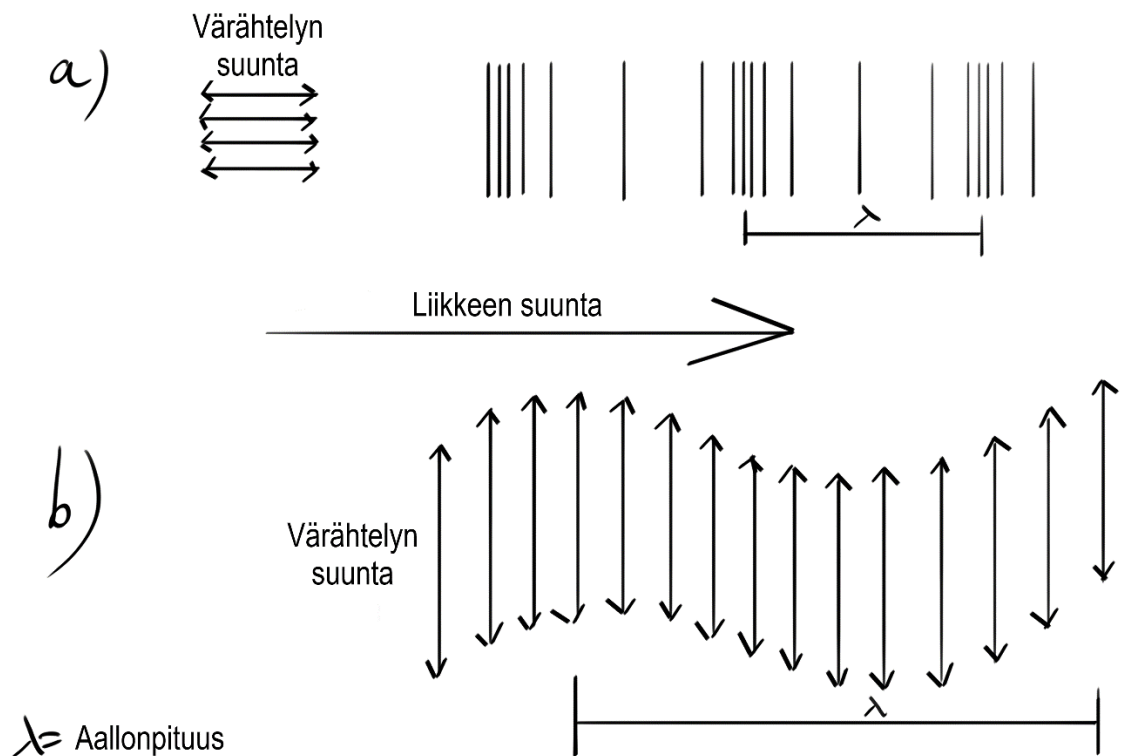
Ultraäänitarkastustekniikoita on lukuisia, josta standardi *SFS-EN ISO 16810* tunnistaa läpäisy- ja pulssikaikutekniikan. Standardissa mainitaan, että lisätietojen saamiseksi voidaan käyttää muita tekniikoita. Tällaisia ovat esimerkiksi korkeudenmuutoksien havaitseminen luotainta liikuttamalla, äänitien mittaaminen ja taajuusanalyysi. (SFS-EN ISO 16810, kohta 5.4)

3.3.1 Ultraäänitarkastuksen toimintaperiaate ja suoritus

Yleisesti ultraäänitarkastus tehdään 0,1–25 MHz taajuudella. Ultraäänen voidaan kuvailla olevan kuin valosäde, molemmat noudattavat aaltoyhtälöä ja kulkevat tietyllä nopeudella väliaineessa. Valon tavoin ultraääni heijastuu pinnoista ja refraktoituu väliaineen muuttuessa. Laadunvarmistuksen kannalta hyödyllisesti ultraääni siroaa osuessaan epäjatkumakohtiin tai hiukkasiin menettäen energiaa ja kuten valon himmentyessä sen intensiteetti pienenee. (ASM Handbook Committee 2001, s. 231)

Toisin kuin valo, ultraääni on mekaaninen aalto, joten se voi kulkea vain elastisessa väliaineessa. Aine voi olla kiinteää, nestemäistä tai kaasumaista. Ääni ei voi kuitenkaan matkata tyhjiössä. Ultraäänitarkastuksessa voidaan hyödyntää useita erilaisia aaltomuotoja, joista yleisimpiä ovat pitkittäis- ja poikittaisaallot.

Pitkittäiset aallot ovat yleisimmin käytetty aaltomuoto ultraäänitarkastuksissa, niitä kutsutaan myös puristusaalloiksi. Tällaiset aallot värähtelevät liikkeen suunnassa kuten esitetty kuvassa 2 a). Poikittaisaallot ovat myös yleisesti käytettyjä, niitä kutsutaan leikkausaalloiksi. Tällöin aallot värähtelevät poikittain liikkeen suuntaan nähden. Tämä aaltomuoto on hahmoteltu kuvassa 2 b).



Kuva 2. Pitkittäis- ja poikittaisaaltoliikettä.

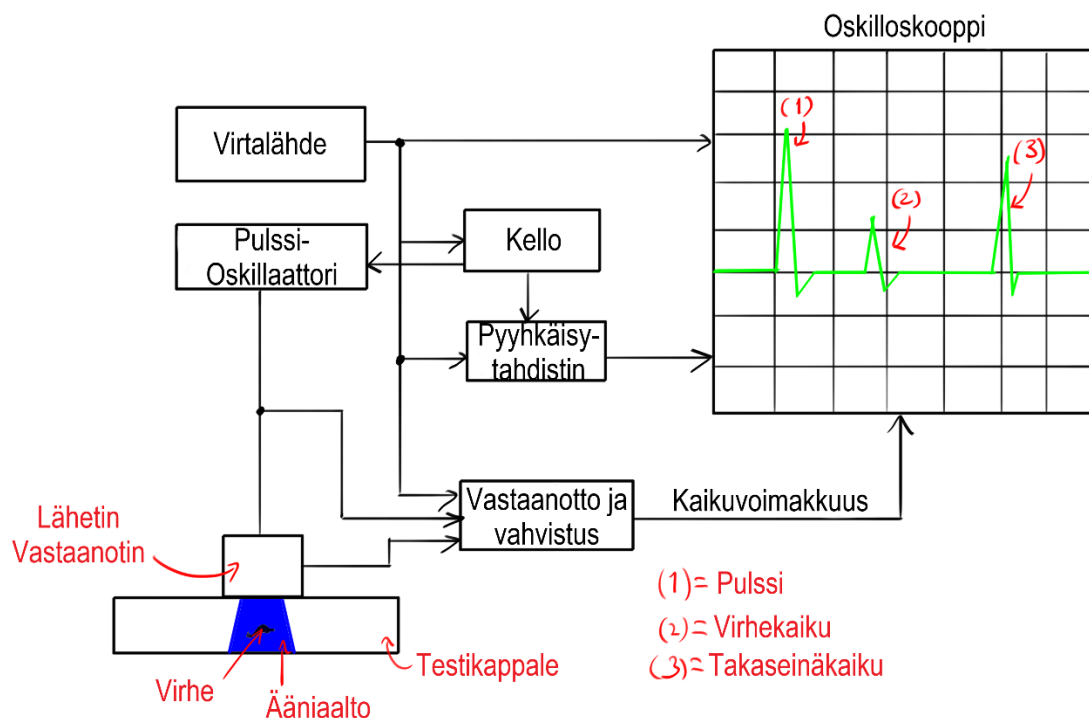
Vähemmän käytettyjä aaltomuotoja ovat pinta-aallot (Rayleigh), jotka kulkevat paksujen kiinteiden kappaleiden pintoja pitkin sekä Lamb-aallot, jotka värähtelevät monimutkaisesti materiaalissa riippuen sen tiheydestä, elastisista ominaisuuksista, rakenteesta ja testikappaleen paksuudesta. (ASM Handbook Committee 2001, s. 234)

Läpäisymenetelmässä lähetin ja vastaanotin ovat testikappaleen eri puolilla ja tarkastuksessa mitataan äänen kulkuaikaa kappaleen läpi. Kun ääni osuu materiaaliveirheeseen, huomattava osa värähtelystä heijastuu takaisin, jolloin vastaanottimelle saapuva signaali on olematon tai heikko ja täten virhe on havaittavissa. Läpäisymenetelmässä on vaikea määrittää virheen syvyysijainti. (Tiainen ja Leinonen 1982, s. 78)

Kaikumenetelmässä lähetin ja vastaanotin ovat samalla puolella testikappaletta. Väliaineessa etenevä ultraääni heijastuu kappaleen takapinnasta tai materiaalivirheestä syntyneestä rajapinnasta. Ultraäänen kulkuetäisyydestä voidaan yksinkertaisesti tutkia näiden rajojen etäisyyksiä. Oskilloskoopille saadaan näkymään kuvan 3 mukainen kuvanto, jossa havaittavana alkuperäinen pulssi, virhekaiku ja takaseinäkaiku. Menetelmässä voidaan käyttää yhdistettyä lähetin-/vastaanotinyksikköä. (Tiainen ja Leinonen 1982, s. 78)

Vähemmän käytetyssä resonanssimenetelmässä käytetään yhdistettyä lähetin-/vastaanotinyksikköä ja keskenään resonoivia kaikupulsseja, jotka resonoivat eri lailla epäsäännöllisyyksien kohdalla. Kuten läpäisymenetelmässä virheen syvyysijaintia on vaikea määrittää. (Tiainen ja Leinonen 1982, s. 78)

Tyypillinen ultraäänilaitteisto on hahmoteltu kuvassa 3. Laitteisto voidaan konfiguroida esittämään tuloksia eri tavoin. Näistä yleisimpiä ovat A- ja B-menetelmä. Kuva on A-menetelmän mukaisista järjestelyistä. Menetelmässä oskilloskoopin vaaka-akselilla on pulssin kulku-aika ja pystyakselilla amplitudi. B-menetelmässä vaaka-akselilla on luotaimen paikka ja pystyakselilla pulssin kulku-aika, tällöin saadaan ns. leikkauskuva kappaleesta. (Tiainen ja Leinonen 1982, s. 79)



Kuva 3. Tyypillinen A-menetelmän ultraäänilaitteisto (mukaihen ASM Handbook Committee 2001, s.242).

Kaikkien ultraäänilaitteiden on täytettävä *EN 12668-1* vaatimukset. Laitteiston valinta riippuu tarkastuksen laadusta ja kyseisen standardin tai teknisen erittelyn vaatimuksista. Luotaimen valintaan vaikuttaa testikappaleen aineenpaksuus, muoto, pinnanlaatu, materiaali ja lämpökäsittely. Luotain täytyy valita siten, että sillä on mahdollista havaita odotettuja epäjatkuvuuksia. (SFS-EN ISO 16810, kohta 6.2.1)

3.3.2 Ultraäänitarkastuksen etuja ja puutteita

Ultraäänitarkastus on isoille kappaleille käytetty sisäisten materiaalivirheiden tarkastusmenetelmä. Suuremmissa aineenvahvuuksissa ultraäänitarkastus tuottaa laadukkaampia tuloksia kuin radiografinen tarkastus, mutta painelaitteiden ohuiden seinämien ja materiaalivalintojen johdosta sen käyttö on vähäistä. Taulukossa 7 esitetään menetelmän etuja ja puutteita.

Taulukko 7. Ultraäänitarkastuksen etuja ja puutteita (ASM Handbook Committee 2001, s. 231–232; Tiainen ja Leinonen 1982, s. 82; Åström 1990, s. 38).

Ultraäänitarkastuksen etuja	Ultraäänitarkastuksen puutteita
Tarkasteltavien kohteiden ainepaksuudet voivat olla erittäin suuria. Sopii hyvin isokokoisten kappaleiden tarkastukseen.	Tarkastus vaatii kokeneen tarkastajan. Tuloksien tulkinta haastavaa.
Korkea herkkyys, pienetkin viat voidaan havaita.	Ainoastaan yksinkertaisille kappaleille.
Välitön tulostus, tuloksia voidaan tarkastella reaaliajassa. Useita tulostustapoja.	Kalibroinnin tarve, tulosten toistettavuus vaatii toimenpiteitä.
Laitteisto on muihin volymetrisiin menetelmiin verrattuna halpa ja pienikokoinen.	Ultraäänen siroaminen tietyissä materiaaleissa vaikeuttaa tarkastusta.
Lujuuden kannalta kriittiset tasomaiset viat voidaan havaita hyvin.	Ei voida havaita pinnan läheisiä virheitä.
Toimii kaikilla teollisilla hitsattavilla materiaaleilla.	Altis muuttujille. Ultraääni ei heijastu, jos se osuu vikaan liian vinosti.
Ei säteilyvaaraa kuten radiografisessa tutkimuksessa.	Kokoarviointi haastavaa.
Koneenosat voidaan tarkastaa niitä irrottamatta, pääsy vaaditaan ainoastaan toiselle pinnalle.	Menetelmällä ei pystytä tutkimaan laajoja alueita kerralla.

3.4 Tunkeumanestetarkastus

Tunkeumanestetarkastus (PT = Penetrant Testing) on usein käytetty tarkastusmuoto painelaitteissa sellaisille muodoille, joita on haastava tarkastella volymetrisin menetelmin, kuten radiografian tai ultraäänen avulla. Tunkeumaneste paljastaa tarkastuskohteen pinnan rikkovat viat, kuten esimerkiksi pintahalkeilun, reunahaavat ja reikiintymisen. Tarkastusmenetelmä ei sovi luonnostaan huokoisille materiaaleille eikä sellaiselle aineelle, jota käytetty testiaine liuottaa. Menetelmällä pystytään havaitsemaan pienimmillään noin 0,1 µm suuriset viat. (Tiainen ja Leinonen 1982, s. 63)

Tunkeumanestetarkastusta käytetään useille eri valmistusmenetelmille. Valetut kappaleet, työstetyt metalliosat, jauhemetalliosat, keraamit, muovit ja lasikappaleet voidaan tarkastaa tunkeumanesteellä. Standardin *SFS-EN 3452* mukaan tunkeumanesteet luokitellaan kolmeen päätyyppiin. Tyyppi I on fluoresoiva tunkeumaneste, joka on yleensä vihreän väristä ja hohtaa ultraviolettivalon alla. Tyypin I tunkeumanestettä on saatavilla eri herkkyysluokissa: ½: erittäin matala, 1: matala, 2: normaali, 3: korkea, 4: erittäin korkea. Tyyppi II on taas värillinen tunkeumaneste, joka on yleensä kirkkaan punaisen väristä ja muodostaa hyvän kontrastin vaaleaan kehitysaineeseen. Tyypin II tarkastusaineiden herkkyys on verrattavissa tyypin I herkkyysluokkaan 2: normaali, jota pidetään riittävänä useimpiin tarkastuksiin. Lisäksi on tyyppi III, joka on kaksitoimisesti fluoresoiva ja värillinen. Standardissa määritellään myös menetelmät A, B, C, D ja E; kehitystavat a, b, c, d, e ja f, jotka selitetään seuraavissa kohdissa. Tunkeumanesteen tunnusmerkintä syntyy näistä siten, että tunnus on esimerkiksi 'IAa Taso 2'. (*SFS-EN 3452-1*, kohta 6.4; *ASM Handbook Committee* 2001, s. 75)

Tunkeumanesteen tehokkuus riippuu monesta asiasta: tarkasteltavasta materiaalista, virheiden laadusta, pinnan esivalmistelusta, tarkastusnesteiden tyypistä, tarkastusmenetelmästä, pinnan lämpötilasta sekä tunkeuma- ja kehityssajasta. Standardin *SFS-EN 3452* mukaan kehitteen, puhdistimen ja tunkeumanesteen on oltava samalta valmistajalta. Standardin mukaisissa tarkastuksissa saa käyttää vain hyväksytyjä tuoteperheitä. (*SFS-EN 3452-1*, kohta 7.2)

3.4.1 Tunkeumanestetarkastuksen toimintaperiaate

Tunkeumanestetarkastus perustuu siihen, että testikappaleen kostuttanut neste jää pinnan vikoihin, josta se voidaan huomata helpommin kuin vika paljaalla silmällä. Riippuen

pinnan virheestä neste voi jäädä muotoihin tai se voi kapillaari-ilmion avulla tunkeutua syvälle reikämäisiin muotoihin.

Nesteen tunkeuduttua testikappaleeseen, täytyy ylimääräinen neste puhdistaa pinnalta. Standardi *SFS-EN 3452* luokittelee menetelmät, jolla tunkeumaneste puhdistetaan poistoaineen mukaan: A: vedellä poistettava, B: jälkiemulgoitava; lipofiilinen, C: liuottimella poistettava, D: jälkiemulgoitava; hydrofiilinen, E: vedellä ja liuottimella poistettava. Menetelmät A, C ja E ovat selkeitä, mutta menetelmät B ja D selitetään seuraavaksi.

Menetelmässä B lipofiilinen emulgointiaine tarkoittaa, että ennen kuin ylimääräinen tunkeumaneste voidaan poistaa testikappaleen pinnalta, se täytyy saattaa vesiliukoiseen muotoon öljypohjaisella emulgointiaineella. Emulgointiaine diffusoituu tunkeumanestekalvoon spontaanisti ja vesihuuhtelu täytyy suorittaa nopeasti, jotta aine ei kerkeä saattaa virheissä piilevää nestettä vesiliukoiseksi. Menetelmä D, hydrofiilinen emulgointiaine, perustuu detergentteihin, eli aineisiin, jotka vähentävät nesteen pintajännitystä. Menetelmässä näiden pesuaineiden ja vesisuihkun mekaanisen agitaation takia ylimääräinen tunkeumaneste peseytyy pois. Nämä menetelmät tuottavat tarkemman ja herkkyydeltään paremman tuloksen kuin vesiliukoiset poistoaineet. Ne ovat kuitenkin työläämpiä suorittaa ja vaativat erityislaitteistoa. (ASM Handbook Committee 2001, s. 75)

Pinnan puhdistamisen jälkeen täytyy siihen levittää kehitysainetta, joka paljastaa vikoihin jääneen tunkeumanesteen. Kehitystapoja on useita, ne on luokiteltu standardissa tapoihin seuraavasti: a: kuiva jauhe, b: vesipohjainen liuos, c: vesipohjainen suspensio, d: liuotinpohjainen (ei-vesipohjainen tyyppille I), e: liuotinpohjainen (ei-vesipohjainen tyypeille II ja III) ja f: erityissovellus. (SFS-EN 3452-1, kohta 6.4)

3.4.2 Tunkeumanestetarkastuksen suoritus

Tunkeumanestetarkastettavan kohteen pinta on ensin valmisteltava. Tämä tarkoittaa mahdollisen hilseen poistoa ja pinnan huolellista puhdistusta sekä kuivausta. Pinnan täytyy olla puhdas vedestä, öljystä tai muista epäpuhtauksista. Pinnan valmistelun jälkeen tunkeumaneste tuodaan testikappaleen pinnalle tasaisesti, esimerkiksi levittämällä tai suihkuttamalla. Nesteen täytyy antaa olla kappaleen pinnalla, kunnes se on tunkeutunut täysin kappaleen pinnanmuotoihin, yleensä noin 5–10 min. Tunkeuma-ajan päätyttyä

ylimääräinen neste puhdistetaan sopivalla poistoaineella, esimerkiksi vedellä. Tämän jälkeen kappaleen pinnalle täytyy tuoda kehitettä tasaisesti, jälleen esimerkiksi levittämällä tai suihkuttamalla. 10–30 minuutin päästä voidaan tarkastella kehitteelle ilmestyneiden väriläiskien laatua, joko näkyvällä valolla tai ultraviolettivalolla. (Tiainen ja Leinonen 1982, s. 63–64)

Tarkastuksessa huomatu tulokset tallennetaan millä tahansa sopivalla menetelmällä, esimerkiksi valokuvan avulla. Teollisuusputkilinjoissa yleensä vika ympyröidään liidulla ja sen viereen kirjoitetaan virheen laatu sekä korjaava toimenpide. Tarkastuksen jälkeen kohde täytyy jälkipuhdistaa vain, jos jäämät voivat häiritä seuraavaa käsittelyä tai laitteen käyttöä. Vaadittaessa on käytettävä sopivaa korroosiosuojausta tarkastuksen päätyttyä.

Tarkastuksesta laaditaan tarkastuspöytäkirja, jossa ilmenee tiedot kohteesta, sen tarkoitus, käytetyn tunkeumanesteen tunnusmerkintä, noudatetut tarkastusohjeet, saadut tulokset, tarkastuspaikka, ajankohta, tarkastaja, tarkastajan valvojan nimi, heidän pätevyytensä ja allekirjoitus. (SFS-EN ISO 3452-1, kohta 9)

3.4.3 Tunkeumanestetarkastuksen etuja ja puutteita

Tunkeumanestetarkastus on yleisesti useille materiaaleille käytetty pintavirheiden tarkastusmenetelmä, joka on nopea ja helppo suorittaa. Menetelmää suositetaan painelaitteissa erityisesti sellaisissa tilanteissa, joissa ei ole tehokasta hyödyntää tarkempia menetelmiä. Tällaisia ovat esimerkiksi pienet istutukset, laipat ja nipat. Taulukossa 8 esitetään tunkeumanestetarkastuksen etuja ja puutteita.

Taulukko 8. Tunkeumanestetarkastuksen etuja ja puutteita (Tiainen ja Leinonen 1982, s. 65–66; Åström 1990, s. 27).

Tunkeumanestetarkastuksen etuja	Tunkeumanestetarkastuksen puutteita
Halpa ja yksinkertainen menetelmä.	Vain pintaan avautuville vioille.
Kaikille paitsi huokoisille materiaaleille.	Jotkut tunkeumanesteet, erityisesti kentällä käytetyt, ovat palonarkoja.
Oikein suoritettuna riittävä tarkkuus useimpiin käyttökohteisiin.	Käytetyt liuottimet ovat terveydelle haitallisia.
	Tarkastus korkeissa lämpötiloissa (>50 °C) tarvitsee erikoisjärjestelyitä.

3.5 Magneettijauhetarkastus

Magneettijauhetarkastus (MT = Magnetic Testing) on ferromagneettisille materiaaleille kehitetty tarkastusmenetelmä, jossa koekappale magnetoidaan kesto-/sähkömagneetilla tai johtamalla siihen sähkövirtaa. Tätä ennen tai magnetoinnin aikana kohteen pinnalle levitetään tarkastusainetta, joka on erittäin hienojakoista ferromagneettista pölyä suspensiossa. Nämä hiukkaset paljastavat epäjatkuvuudet koekappaleen magnetisoinnissa ja täten materiaalivirheet.

Magneettijauhetarkastus on standardoitu *SFS-EN ISO 9934* mukaisesti. Tarkastusta käytetään ensi sijassa pinnan rikkovien virheiden, erityisesti halkeamien, havaitsemiseen. Magneettijauhetarkastus voi paljastaa myös välittömästi pinnan alla olevia materiaalivirheitä, vaikkakin tarkkuusherkyys kärsii nopeasti mitä syvemmällä havaittava vika on. (SFS-EN ISO 9934-1:2016, kohta 1)

Tarkasteltavien kohteiden on oltava puhtaita ja niiden epämagneettiset pinnoitteet tulee olla maksimissaan 50 µm paksuja (SFS-EN ISO 9934-1:2016, kohta 7). Tämä rajoittaa tarkastelukohteet yleensä vain maalaamattomiin pintoihin. Tarkastus edellyttää, että materiaali on ferromagneettista. Tällaisia materiaaleja ovat useimmat rauta-, nikkeli ja kobolttilejeeringit. Menetelmää ei voida hyödyntää alumiini-, magnesium-, kupari-, lyijy- tai titaaneoksille. Myös austeniittiset ruostumattomat teräkset eivät ole ferromagneettisia ja täten niitä ei voida tarkastaa tällä menetelmällä. (ASM Handbook Committee 2001, s. 89)

Tarkastuksen näyttämien tehostamiseksi voidaan käyttää värillistä tai fluoresoivaa tekniikkaa. Värillisessä tekniikassa käytetään värillistä magneettijauhetta ja ohutta kerrosta kontrastiväriä testikappaleen pinnalla. Fluoresoivassa tekniikassa käytetään taas jauhetta, joka hohtaa ultraviolettivalossa. (Tiainen ja Leinonen 1982, s. 66)

3.5.1 Magneettijauhetarkastuksen toimintaperiaate

Magneettijauhetarkastuksen toiminta perustuu ilmiöön, jossa ferromagneettiseen materiaaliin magnetoinnin aikana epäjatkuvuuskohdat koekappaleessa aiheuttavat magneettikenttään hajavuon, joka on yleensä poikittainen indusoituun magneettikenttään nähden (ASM Handbook Committee 2001, s. 89). Pinnalle levitetyn magneettipulverin, yleensä rauta- tai rautaoksidipulverin, hiukkaset asettuvat magneettikenttien

voimaviivojen suuntaisesti. Tällöin jauhehiukkaset kasaantuvat esimerkiksi halkeaman kohdalle, jolloin virhe voidaan huomata. Voimaviivojen suuntainen virhe ei muodosta hajavuota ja on täten huomaamaton. Tästä syystä magnetointi tulisi tehdä vähintäänkin kahdesta suunnasta. Tarkastuksessa pitää käyttää vähintään tiheydeltään 1 T magneettivuota. (SFS-EN ISO 9934-1:2016, kohta 8.1) Magnetointimenetelmiä on useita ja ne voidaan jakaa virtamagnetointi- ja vuomagnetointimenetelmiin. (Tiainen ja Leinonen 1982, s. 66)

Virtamagnetointimenetelmät voidaan jakaa edelleen. Suorassa virtamagnetoinnissa sähkövirta johdetaan tarkastuskohteen läpi, jolloin suurin tarkasteluherkkyys saavutetaan virran suuntaisille epäjatkuvuuskohdille. Kohtiomagnetoinnissa virta johdetaan käsikohtioiden tai kiinnipuristettujen kohtioiden kautta tarkastettavaan kappaleeseen. Kohtioita liikutellaan tarkastusohjeen mukaisesti koko tarkastusalueen kattamiseksi. Induktioimagnetointi toimii siten, että rengasmuotoinen tarkastuskappale toimii muuntajakäämin toisiopiirinä. (SFS-EN ISO 9934-1:2016, kohta 8.3.2)

Vuomagnetointimenetelmät voidaan jakaa toimintaperiaatteiden mukaan. Apujohdinmagnetoinnissa tarkastuskappaleen aukkoon pujotetaan kaapeli tai eristetty tanko, jonka läpi johdetaan virtaa. Viereisjohdinmagnetoinnissa magnetointi toteutetaan testikappaleen viereen asetetulla kaapelilla. Kiinteässä magneettipenkissä magnetoinnissa kappale asetetaan penkin leukoihin, jossa se on kosketuksissa sähkömagneettiin molemmilta puolin. Iesmagnetoinnissa sähkömagneetin navat asetetaan tarkastuskohteen pinnalle, jolloin tarkastettava kohde rajoittuu ympyrään, joka mahtuu napojen välille. Magnetointi kiinteällä kelalla tapahtuu siten, että tarkastuskohde asetetaan kelan sisälle, jolloin kappale magnetoituu kelan akselin suunnassa. Taipuisalla kelalla toteutettu magnetointi toimii samalla periaatteella, mutta kela kierretään taipuvasta johdosta kappaleen ympärille. (SFS-EN ISO 9934-1:2016, kohta 8.3.3)

3.5.2 Magneettijauhetarkastuksen suoritus

Hitsien tarkastamisesta magneettijauheella on säädetty standardissa *SFS-EN ISO 17638*. Magnetointi pitää standardin mukaan tehdä vaihtovirralla toimivilla sähkömagneettisella ieksellä, kohtiolla varustetulla virtamagnetointilaitteella, viereisjohdin-, apujohdin- tai kelatekniikalla. Sovellusstandardissa voidaan esittää standardista poikkeava tarkastustapa, jota tulee noudattaa. (SFS-EN ISO 17638:2017, kohta 5.5.1)

Magneettijauh tarkastuksessa on tärkeää todeta magnetoinnin riittävyys, tämä varmennetaan *SFS-EN ISO 9934-1:2016, kohdan 8.2* mukaisesti. Rakenneteräksien hitsejä tarkastaessa tangentiaalinen kenttävoimakkuus suositellaan olevan 2–6 kA/m. Pinnan magneettivuon riittävyys pitää todentaa, joko käyttämällä testikappaletta, mittaamalla Hall-anturilla, laskemalla likimääräinen virta-arvo tai käyttämällä jotain toista vakiintuneisiin periaatteisiin perustuvaa menetelmää. (SFS-EN ISO 17638:2016, kohta 5.5.2)

Ennen magnetointia tai sen aikana testikohteeseen levitetään tai ripotellaan tarkastusainetta, joka täyttää *ISO 9934-2* vaatimukset. Sitten testikappaletta voidaan tutkia *ISO 3059* mukaisissa tarkasteluolosuhteissa. Tämän jälkeen tuloksista tehdään tavanomainen pöytäkirja, johon lisätään näyttämät jollakin menetelmällä. Esimerkiksi kirjallisena selostuksena, piirustuksena tai valokuvana. (SFS-EN ISO 17638:2016, kohdat 5.5.7–5.5.8 ja 5.5.12)

Yleensä tarkastusjauhe joudutaan puhdistamaan pois sen kuluttavien ominaisuuksien takia. Tämä edellyttää ensin testikappaleen demagnetointia. Tällöin virta johdetaan päinvastaiseen suuntaan kuin magnetoinnissa. Demagnetointi voi olla tarpeen myös ennen tarkastusta, jos testikappaleen alkuperäinen jäännösmagnetismi on tarpeeksi vahva häiritäkseen tarkastusta. Magneetikentän voimakkuus selvitetään ja demagnetointi aloitetaan suuremmalla tai yhtä suurella kuin alkuperäinen magnetointi. Täydellinen demagnetointi on kuitenkin lähes mahdotonta, varsinkin tasavirralla toteutetun magnetoinnin jälkeen. (SFS-EN ISO 9934-1:2016, kohta 13)

3.5.3 Magneettijauh tarkastuksen etuja ja puutteita

Magneettijauh tarkastus on ferriittisten teräksien pintavirheiden tarkastukseen käytetty menetelmä. Useissa kemikaaliteollisuuden ympäristöissä ei kuitenkaan voida kontaminaatoriskin takia hyödyntää menetelmää. Lisäksi painelaitteissa harvoin käytetään yksinomaan ferriittisiä materiaaleja, jolloin on tehokkaampaa suosia kaikille materiaaleille kelpoista tunkeumanestetarkastusta. Taulukossa 9 esitetään magneettijauh tarkastuksen etuja ja puutteita.

Taulukko 9. Magneettijauhetautarkastuksen etuja ja puutteita (Tiainen ja Leinonen 1982, s. 69).

Magneettijauhetautarkastuksen etuja	Magneettijauhetautarkastuksen puutteita
Herkkä ja nopea menetelmä.	Soveltuu ainoastaan ferromagneettisille materiaaleille.
Antaa luonnollisen kuvan pintavirheistä.	Vaatii jälkitoimenpiteitä, kuten kohteen demagnetoinnin ja tarkastusaineen poistamisen.
Havaitsee vieraat aineet.	Magnetoinnissa käytetty sähkövirta voi aiheuttaa kappaleen lämpenemistä ja polttojälkien syntymistä.
Voidaan havaita myös välittömästi pinnan alla olevia epäjätkumia.	Näyttämien tulkinta vaatii kokemusta.
Pinta saa olla käsitelty ohuesti, esimerkiksi lakattu.	Testikappaleen geometria voi vaikeuttaa tarkastusta.
Helposti automatisoitavissa.	Vaatii useita tarkastuskertoja samalle kohteelle, sillä tarkastuksen herkkyyss riippuu magneettivuon suunnasta suhteessa vikaan.

3.6 Pyörrevirtatarkastus

Pyörrevirtatarkastus (ET = Eddy current Testing) on tarkastusmenetelmä, jossa sähköä johtavasta materiaalista valmistettuun kappaleeseen indusoidaan pyörrevirtoja sähkömagneetin avulla. Näiden aiheuttamaa sekundääristä magneettikenttää tutkimalla voidaan havaita epäjätkuvuuskohtia materiaalissa (ASM Handbook Committee 2001, s. 164). Pyörrevirtatarkastus on erittäin monikäyttöinen tarkastusmenetelmä, jolla voidaan tarkastella materiaalivirheiden lisäksi pinnoitteen kalvonpaksuutta ja kappaleen materiaaliominaisuuksia (Åström 1990, s. 32).

Pyörrevirtatarkastusta käytettiin ennen lähes yksinomaan ei-ferriittisten materiaalien tarkastamiseen, kuten voidaan huomata Tiaisen ja Leinosen luentomonisteesta ja Åströmin teoksesta vuosilta 1982 ja 1990 vastaavasti. Tämä johtuu ferriittisten metallien epäsäännöllisestä magneettikentästä, joka aiheuttaa häiriötä tutkittavaan pyörrevirran aiheuttamaan magneettikenttään. Tämä ongelma on nykypäivänä pitkälti ratkaistu ja hitsien pyörrevirtatarkastusta käsittelevässä standardissa *SFS-EN ISO 17643* vuodelta 2015 mainitaankin, että menetelmä olisi pääasiassa ferriittisille materiaaleille. (Tiainen ja Leinonen 1982, s. 70; Åström 1990, s.32; SFS-EN ISO 17643, kohta 1)

Syvyys, jolta menetelmällä voidaan havaita virheitä, riippuu materiaalin ominaisuuksista ja käytetyn anturin taajuudesta. Yleensä laitteet toimivat 1–1000 kHz taajuuksilla, kuitenkin hitsien tarkistamisen käytetyt anturit täytyy olla 100–1000 kHz välisellä alueella (SFS-EN ISO 17643, kohta 6.4.1). Standardin sallimalla minimitaajuudella 100 kHz pystytäisiin esimerkiksi tyypillisellä ruostumattomalla teräksellä tarkastamaan noin 5 mm syvyyteen asti. Jos taajuus nostetaan 1 MHz, syvyys putoaa noin 0,5 millimetriin. (ASM Handbook Committee 2001, s. 169)

3.6.1 Pyörrevirtatarkastuksen toimintaperiaate

Pyörrevirtatarkastuksen periaate on sama kuin induktioliedessä, teho on vain pienempi. Induktiokäämiä käytetään erittäin pienellä teholla, jotta häiriö minimoituu. Tarkastuksessa kaikkia magneettikentässä tapahtuvia muutoksia seurataan elektroniikan avulla tarkasti. Testikohteen lähelle asetettuun induktiokäämiin johdetaan vaihtovirtaa, jolloin sähkömagneettisen induktion johdosta testikappaleeseen muodostuu pyörrevirtoja suljetuissa piireissä. Näiden pyörrevirtojen suuruus ja vaihe riippuu induktiokäämin primäärikentästä, testikappaleen ominaisuuksista ja sähkömagneettisten kenttien vuorovaikutuksesta kappaleen sisällä. Tällöin pyörrevirtausta häiritsevät epäjatkuvuudet materiaalissa voidaan havaita sekundäärikentän muutoksina, joka ilmenee jännitteen, impedanssin tai virran muutoksena primäärikäämillä tai erillisellä anturikäämillä. (ASM Handbook Committee 2001, s. 165)

Ferromagneettiset materiaalit vaikeuttavat pyörrevirtatarkastusta, koska niiden magneettiset ominaisuudet riippuvat jäännösmagnetismista. Tarkastuksen kannalta tärkeimmät huomioitavat mekanismit ovat ferromagneettisten materiaalien magneettinen saturoituminen ja testikappaleiden epäsäännölliset ominaismagneettikentät. (ASM Handbook 2001, s. 168)

Ferromagneettinen materiaali voidaan saattaa tarkastettavaksi pyörrevirralla siten, että kohde magnetoidaan tasaisesti kauttaaltaan. Magnetoinnin täytyy olla niin vahva, että materiaali magneettisesti saturoituu. Tällöin materiaalin ominaiskenttä on 'vaimennettu' ja pyörrevirtojen aiheuttamat muutokset sekundäärikentässä ovat eriteltävissä (ASM Handbook Committee 2001, s. 169). Nämä toimenpiteet voidaan suorittaa tarkastuksen aikana ilman lisätoimenpiteitä, kun käytetään erityistä ferromagneettisille materiaaleille suunniteltua anturityyppiä.

Pyörrevirtatarkastus vaatii kalibroinnin, jotta voidaan varmistua tulosten toistettavuudesta. Tämä toteutetaan käyttämällä vertailukappaletta, jossa on kipinätyöstettyjä uria. Urien syvyydet ovat 0,5 mm, 1 mm ja 2 mm ja niiden suositeltava leveys on alle 0,2 mm ellei toisin määritellä sovellusstandardissa. (SFS-EN ISO 17643, kohta 6.4.3.1)

3.6.2 Pyörrevirtatarkastuksen suoritus

Tarkastus aloitetaan valitsemalla anturityyppi sekä taajuus kohteen mukaan. Vertailukappale täytyy tarkastaa ensin ja todentaa laitteiston toimivuus. Jos kohde on pinnoitettu eristekalvolla, esimerkiksi maalilla, täytyy käyttää sähköä johtamatonta lisävertailupalaa todentamaan laitteiston kyky havaita kalvo ja toimia sen läpi. (SFS-EN 17643, kohta 6.4.3)

Laite säädetään liikuttelemalla anturia vertailukappaleiden ja sähköä johtamattomien vertailupalojen yhdistelmän yli. Laitteisto skaalataan näyttämään suurenevia tuloksia urien syvyyden kasvaessa (SFS-EN 17643, kohta 6.5.3.2). Kun laitteiston toimivuus on varmistettu, voidaan aloittaa luotaaminen. Anturia on liikuteltava kohtisuorassa epäjatkuvuuksien suhteen. Jos virheiden suunnat eivät ole tiedossa tai niitä on useampia, täytyy luotaus suorittaa vähintään kahdessa toisiaan kohtisuorassa suunnassa (SFS-EN ISO 17643, kohta 6.5.3). Tarkastuksesta tehdään tarkastuspöytäkirja tavanomaiseen tapaan.

3.6.3 Pyörrevirtatarkastuksen etuja ja puutteita

Pyörrevirtatarkastus on sähköä johtavien materiaalien pintavirheiden ja välittömästi pinnan alapuolisten materiaalivirheiden tarkastukseen käytetty menetelmä. Painelaitteiden laadunvarmistamisen käyttökohteissa on harvoin yksinkertaisia muotoja, jolloin pyörrevirtatarkastuksella on haastavaa saada luotettavia tuloksia. Taulukossa 10 esitetään pyörrevirtatarkastuksen etuja ja puutteita.

Taulukko 10. Pyörrevirtatarkastuksen etuja ja puutteita (ASM Handbook Committee 2001, s. 164; Tiainen ja Leinonen 1982, s. 71).

Pyörrevirtatarkastuksen etuja	Pyörrevirtatarkastuksen puutteita
Kontakti tarkastettavan kappaleen ja anturin välillä ei ole pakollinen.	Vain sähköä johtaville materiaalille.
Voidaan selvittää virheiden syvyyksiä.	Ainoastaan yksinkertaisille geometrioille.
Voidaan tarkastella aineen materiaaliominaisuuksia, kuten muutoksia kovuudessa tai lujuudessa.	Tulosten luotettavuudesta vaikea varmistua useiden muuttujien takia.
Ei ole altis epäpuhtauksille.	Ferromagneettisten materiaalien tarkastus vaatii erityislaitteistoa.
Suuri tarkastusnopeus.	
Yksinkertainen automatisoida.	

4 PAINELAITTEIDEN STANDARDOINTI

Tärkein painelaitteiden standardointia koskeva dokumentti Suomessa on *Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2014/68/EU*, tai tunnetummin painelaitedirektiivi eli PED. Direktiivi koskee painelaitteiden lainsäädännön yhdenmukaistamista Euroopan unionin jäsenmaissa. Merkittävin direktiivin alainen standardi on *EN 13445*, jonka osat käsittelevät tulistamattomia painelaitteita kokonaisuudessaan.

Painelaitteita koskevia standardeja on lukuisia. Suomalaiset kansalliset standardit koskevat yleensä tarkasti rajoitettuja kokonaisuuksia, kuten esimerkiksi *SFS 5832 Kaasupullot lääkkeellisessä käytössä. Venttiilin ulosotto ja täyttöyhteet*. Vahvistetut eurooppalaiset ja kansainväliset standardit kattavat huomattavan osan standardoinnista. Kuitenkin laajimmat standardit, jotka käsittelevät yleisesti painelaitteita, ovat eurooppalaisia standardeja.

Yksittäisten standardien suuren määrän ja niiden tarkoin rajatuin soveltamisalojen takia käsitellään tässä kappaleessa standardointia ainoastaan painelaitedirektiivin kautta, keskittyen standardointiin teollisuusputkiston laadunvarmistuksen näkökulmasta. Tarkoituksena on selvittää PED:in mukainen painelaitteen luokitus ja mitä se tarkoittaa painelaitteiden valmistajalle pääpiirteisesti.

Lopuksi tutkitaan suppeasti historiallisesti merkittäviä sekä nykyajan ulkomaalaisia standardointeja. Vertailu standardointijärjestelmien välillä on haasteellista niiden monimutkaisuuden ja erilaisten lähtökohtien vuoksi, mutta osiossa esitetään merkittävimmät erot.

4.1 Painelaitedirektiivi

Direktiivi koskee painelaitteita, joiden suurin käyttöpaine on yli 0,5 bar. PED on lakitekstiä ja täten byrokraattista, tehden sen tulkitsemisesta yksiselitteisesti haasteellista. Pähkinänkuoressa direktiivi määrittelee mihin vaarallisuusluokkaan painelaite sijoittuu ja minkälaisia asetuksia täytyy noudattaa, jotta painelaite voi saada CE-merkinnän ja tulla hyväksytyksi Euroopan unionin markkinoille. PED:issä mainitaan lukuisia tapauksia, jossa direktiiviä ei tarvitse soveltaa, CE-merkintää ei tarvita tai muita poikkeuksia. Näihin ei perehdytä tässä työssä.

Direktiivissä painelaitteiden sisällöt jaetaan kahteen ryhmään. Ryhmä 1 koostuu erillisessä asetuksessa (EY) N:o 1272/2008 vaarallisiksi luokitelluista aineista, kuten syttyvistä kaasuista ja useista hapettavista nesteistä. Ryhmä 2 koostuu aineista, jotka eivät sisälly ryhmään 1. (2014/68/EU, artikla 13 kohta 1)

PED jakaa painelaitteet neljään vaarallisuusluokkaan ja hyvän konepajakäytännön alaiseksi. Näitä kutsutaan puhekielessä 'PED-luokiksi'. Painelaitedirektiivin 4 artikla määrittää mihin vaarallisuusluokkaan painelaite kuuluu. Nämä luokat esitetään roomalaisin numeroin I, II, III ja IV. Hyvän konepajakäytännön alainen luokitus kirjoitetaan yleisesti '4.3' johtuen siitä, että PED artikla 4 kohdassa 3 määrittellään painelaitteet ja laitekokonaisuudet, jotka voidaan valmistaa jäsenvaltion oman hyvän konepajakäytännön mukaisesti.

Artiklan 4 kohdissa 1 ja 2 viitataan direktiivin liitteeseen II, jossa esitetään kuvaajina vaarallisuusluokkien rajat suunnittelupaineen PS ja painelaitteen tilavuuden V tai putkiston nimellisen mitan DN funktiona. Artiklassa huomioidaan painelaitetyyppi ja sisältöryhmä, joista muodostetaan liitteessä II yhdeksän kuvaajaa. Näiden lisäksi direktiivissä mainitaan lukuisia poikkeuksia, jotka eivät kuulu tämän työn laajuuteen. (2014/68/EU, artikla 4 ja liite II)

Vaarallisuusluokkien perusteella määritetään direktiivin artiklassa 14 arviointimenettelyt, joita tulee soveltaa. PED:issä määritellään 'moduuleja', joista nämä arviointimenettelyt rakentuvat. Tämä yhteys esitetään taulukossa 11. Moduulien sisältö esitetään direktiivin liitteessä III, jota käsitellään seuraavissa kohdissa.

Taulukko 11. Arviointimenettely moduulit vaarallisuusluokkien mukaisesti (mukaillen 2014/68/EU, liite II kohta 1).

Vaarallisuusluokka	Arviointimenettelyt
I	A
II	A2, D1, E1
III	B(suunnittelutyypin) + D, B(suunnittelutyypin) + F, B(tuotantotyypin) + E, B(tuotantotyypin) + C2, H
IV	moduuli B (tuotantotyypin) + D, B (tuotantotyypin) + F, G, H1

Moduulien sisällöissä on paljon toistoa, sillä ne ovat kaikki toisistaan riippumattomia ja erillisiä. Tässä työssä esitetään arviointimenettelyjen päävaikutukset laadunvarmistukseen, takertumatta yksityiskohtiin. Vaarallisuusluokat esitetään tiukentuvassa järjestyksessä. Jokaisessa alakappaleessa esitetään myös esimerkkitapaus ja kuinka tälle tulkitaan vaarallisuusluokka. Esimerkkitapauksissa keskitytään teollisuusputkistoon, josta tämän työn kirjoittajalla on omaa kokemusta. Lukuun ottamatta vaarallisuusluokkaa IV, joka ei koske putkistoa.

4.1.1 Hyvä konepajakäytäntö

Painelaitedirektiivin artiklan 4 kohdan 3 mukaan, jos painelaitteen ominaisuudet ovat artiklan 4 kohtien 1 ja 2 rajojen ulkopuolella, niin tuote suunnitellaan ja valmistetaan jäsenvaltion hyvän konepajakäytännön mukaisesti. Laitteiden mukana on oltava myös riittävät käyttöohjeet. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes) selventää PED soveltamisohjeissaan hyvän konepajakäytännön tarkoittavan sitä, että valmistaja suunnittelee painelaitteen huomioiden kaikki turvallisuuteen vaikuttavat tekijät sekä valmistaa, tarkastaa ja toimittaa käyttöohjeineen tuotteen siten, että sen turvallisuus on taattu koko käyttöiän (Tukes 2020, kohta I-01). Tässä tapauksessa laitteeseen ei kiinnitetä CE-merkintää poiketen muista PED-luokan painelaitteista. (2014/68/EU, artikla 4 kohta 3)

Otetaan esimerkkinä tiivistevesilinja, jonka suunnittelupaine on 6 bar ja putkiston koko DN25. Lisäksi tiedetään veden kuuluvan sisältöryhmään 2. Tällöin voidaan tulkita direktiivin artiklan 4 kohdan 1 alakohdan c alakohdan i toista luettelokohtaa, josta todetaan tämän putkiston olevan pienempi kuin alaraja DN32. Täten se kuuluu artiklan 4 kohdan 3 mukaiseen hyvän konepajakäytännön alaisuuteen.

4.1.2 PED-vaarallisuusluokka I

Ensimmäinen PED-luokka asettaa direktiivin perustason, *MODUULI A: SISÄINEN TUOTANNONVALVONTA*, jossa valmistaja varmistaa ja vakuuttaa yksinomaisesti vastuullaan, että kyseinen tuote täyttää painelaitedirektiivin vaatimukset. Tämä vastuu liittyy kolmeen osa-alueeseen.

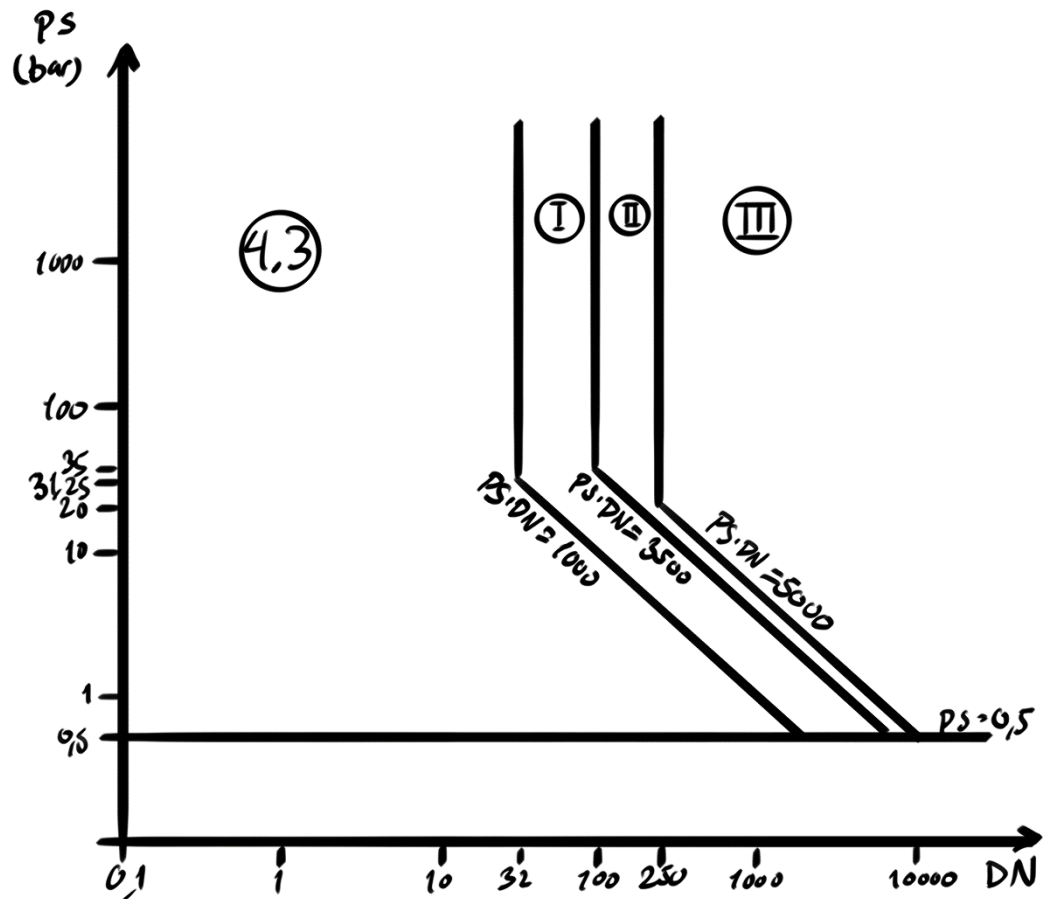
Valmistajan on laadittava tekniset asiakirjat, joiden perusteella on pystyttävä arvioida, onko painelaitteen suunnittelu, valmistus ja toiminta asianmukaista. Teknisten

asiakirjojen on sisällettävä ainakin painelaitteen yleinen kuvaus, kaikki tarvittavat suunnittelu- ja valmistuspiirustukset, kaikki esitykset ja selvitykset, jotka selittävät näitä piirustuksia ja kaavioita sekä painelaitteen toimintaa, luettelo standardeista, joita on sovellettu, suoritettujen suunnittelulaskelmien ja tarkastuksien tulokset sekä testiraportit. (2014/68/EU, liite III kohta 1 alakohta 2)

Valmistajan on tehtävä kaikki toimenpiteet, jotta valmistetut painelaitteet toteuttavat edellisessä kohdassa mainittujen teknisten asiakirjojen sekä tämän direktiivin vaatimukset. Kolmas ja viimeinen osa-alue vaatii valmistajaa kiinnittämään CE-merkinnän jokaiseen yksittäiseen painelaitteeseen, joka on direktiivin mukainen. Lisäksi valmistajan on laadittava kirjallinen EU-vaatimustenmukaisuusvakuus ja säilytettävä se teknisten asiakirjojen kanssa kymmenen vuoden ajan. Näiden dokumenttien kopiot ovat toimitettava viranomaiselle pyynnöstä. (2014/68/EU, liite III kohta 1 alakohdat 3 ja 4)

PED-luokkien painelaitteelle täytyy suorittaa lopputarkastus, jossa silmämääräisesti ja liiteasiakirjojen tarkastuksella varmistetaan painelaitedirektiivin vaatimusten noudattaminen (2014/68/EU, liite I kohta 3.2.1). Lopputarkastukseen on kuuluttava myös painekoe, johon palaamme myöhemmin. Lopputarkastukseen kuuluu myös mahdollisten varolaitteiden tarkastus. Luokan I painelaitteille valmistaja voi itse suorittaa tämän lopputarkastuksen ilman ulkopuolista valvontaa. Käytännössä, kun yritys noudattaa jotain ulkoista standardisarjaa laadunhallinnan ja -varmistuksen takaamiseksi, kuten esimerkiksi *ISO 9000*, ei luokilla 4.3 ja PED-I ole konkreettista eroa, sillä nämä laadunhallintajärjestelmät yleensä velvoittavat tarkempaan valvontaan kuin PED-luokka I.

Esimerkkitapauksena voidaan käsitellä typpikaasulinjaa, jonka suunnittelupaine on 7,5 bar sekä putken koko on DN200. Inerttinä kaasuna typpi kuuluu sisältöryhmään 2. Kuvasta 4 voidaan todeta vaarallisuusluokan olevan välillä $PS \cdot DN > 1000$ ja $PS \cdot DN < 3500$. Kyseisen putkilinjan $PS \cdot DN$ arvo on $7,5 \cdot 200$, eli 1500. Tällöin putkilinja kuuluu vaarallisuusluokkaan I.



Kuva 4. Direktiivin 2014/68/EU artiklan 4 kohdan 1 alakohdan c alakohdan i toisen luettelamakohdan mukainen luokittelukuvaaja (mukaillen 2014/68/EU, liite II taulukko 7).

4.1.3 PED-vaarallisuusluokka II

Seuraava vaarallisuusluokka painelaitedirektiivissä on luokka II, joka määrittelee ilmoitetun laitoksen käsitteen. Ilmoitettu laitos on yritys tai organisaatio, joka on EU:n hyväksymä suorittamaan kolmannen osapuolen vaatimia tarkastuksia ja arvioimaan laadunhallintaa. Vaikka PED vaarallisuusluokkien sisältämät moduulit ovat kaikki toisistaan riippumattomia, esitetään ne ikään kuin edelliseen luokkaan lisättäisiin vaatimuksia ja vastuuta.

Luokassa II voidaan huomata olevan useita mahdollisia arviointimenettelyitä. Näistä painelaitteen tai sen osan valmistajan täytyy täyttää yksi. Ensimmäinen menettely, *MODUULI A2: SISÄINEN TUOTANNONVALVONTA JA VALVOTUT PAINELAITETARKASTUKSET SATUNNAISIN VÄLIAJOIN*, määrää, että sisäisen tuotannonvalvonnan lisäksi valmistajan valitsema ilmoitettu laitos suorittaa tuotetarkastuksia satunnaisin väliajoin painelaitteen sisäisen laadunvalvonnan

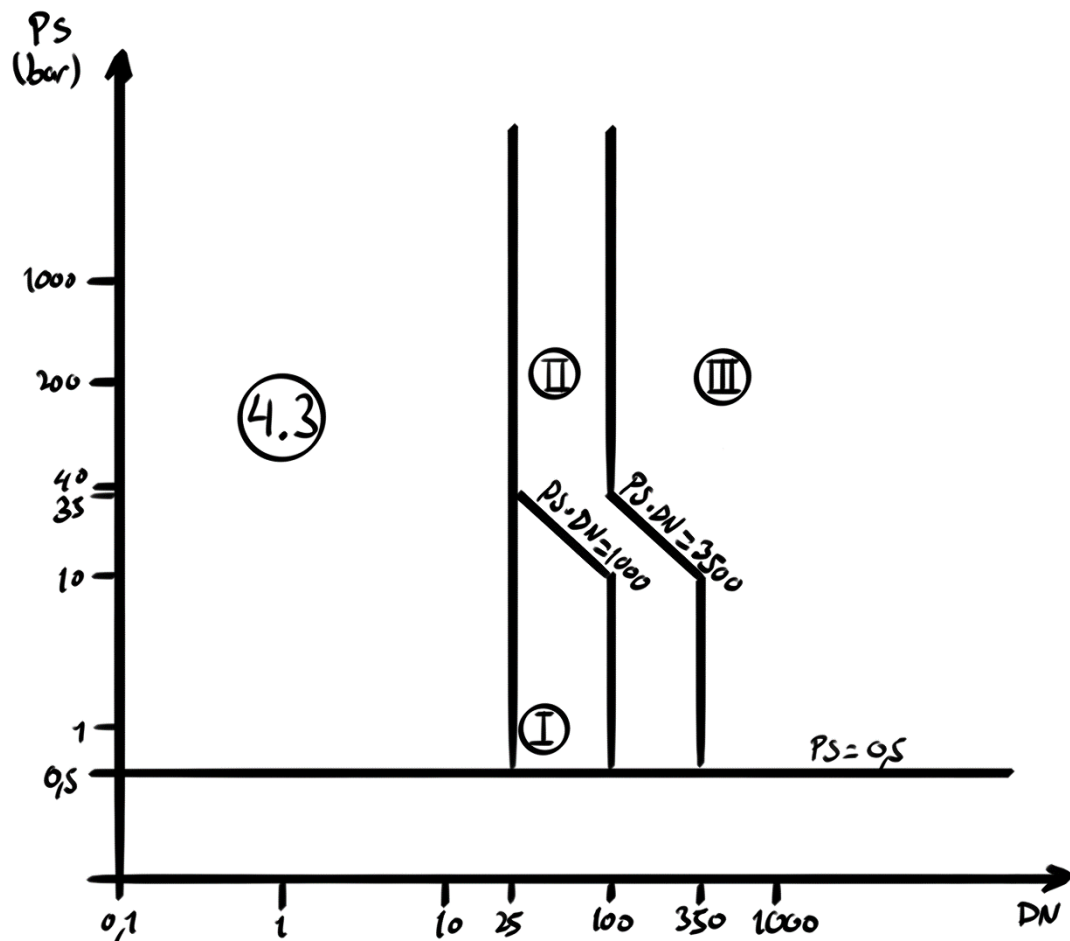
riittävyys määrittämiseksi. Näissä käynneissä täytyy huomioida valmistettavien laitteiden tekninen monimutkaisuus ja tuotannon määrä. Tarkastuksen avulla tulee selvittää, kykeneekö valmistusprosessi tuottamaan hyväksyttäviä painelaitteita. Jos tarkastuksessa ilmenee puutteita, täytyy ilmoitetun laitoksen toteuttaa aiheelliset toimenpiteet laadun varmistamiseksi. Laitos päättää näytteeksi otettavien painelaitteiden määrän ja niiden lopputarkastuksen laajuuden. (2014/68/EU, liite III kohta 2 alakohta 4)

Jos valmistaja noudattaa jo jotain laatujärjestelmää, voi tämä arviointimenettelyn, *MODUULI DI: TUOTANTOPROSESSIN LAADUNVARMISTUS*, mukaisesti hakea laatujärjestelmälleen hyväksyntää valitsemaltaan ilmoitetulta laitokselta. Laitoksen tehtävänä on arvioida laatujärjestelmän riittävyttä kyseessä olevan painelaitteen valmistukseen ja sittemmin valvoa tuotantoa. Ilmoitetulla laitoksella ei ole velvoitetta suorittaa satunnaisia tarkastuksia kuten moduulissa A2, mutta laitoksella on velvollisuus varmistaa, että valmistaja täyttää laatujärjestelmän vaatimukset asianmukaisesti. Laitoksella täytyy olla pääsy tuotanto-, tarkastus- ja varastotiloihin sekä kyky tehdä tai teettää tuotetestejä kuten moduulissa A2. Ilmoitetun laitoksen on tehtävä auditointeja valmistajan laatujärjestelmään määräajoin siten, että täydellinen uudelleenarviointi tehdään joka kolmas vuosi. (2014/68/EU, liite III kohta 6)

Viimeinen vaihtoehto, *MODUULI EI: PAINELAITTEEN LOPPUTARKASTUKSEN JA TESTAUKSEN LAADUNVARMISTUS*, määrittää, että valmistaja voi itse tarkastaa jokaisen painelaitteen jotakin laatujärjestelmää noudattaen. Kuin moduulissa DI, ilmoitetun laitoksen täytyy hyväksyä laatujärjestelmä ja valvoa sen noudattamista. (2014/68/EU, liite III kohta 8)

Käytännössä PED-II luokan painelaitteille määrätään hankkeen alussa asiakkaan kanssa jokin osuus, esimerkiksi 30 %, joka on tarkastettava kolmannen osapuolen toimesta. Tällöin teollisuusputkien valmistuksessa ja asennuksessa esimerkiksi 30 % hitsausaumoista tarkastettaisiin jollakin ainetta rikkomattomalla menetelmällä. Jos tarkastuksessa ilmenee epäkohtia, täytyy ne korjata ja yleisen käytännön mukaisesti otetaan lisää ns. sakkotarkastuksia muista mahdollisimman samanlaisista tuotteista. Direktiivissä mainitaan vain aiheelliset toimenpiteet ja nämä vaihtelevat valmistettavasta painelaitteesta ja valmistussopimuksesta riippuen.

Esimerkkinä happilinja DN150, jonka suunnittelupaine on 7,5 bar. Happikaasu on luokiteltu vaaralliseksi aineeksi, joten se kuuluu sisältöryhmään 1. Kuvasta 5 voidaan todeta putkiston kuuluvan vaarallisuusluokkaan II.



Kuva 5. Direktiivin 2014/68/EU artiklan 4 kohdan 1 alakohdan c alakohdan i ensimmäisen luetelmakohdan mukainen luokittelukuvaaja (mukaiillen 2014/68/EU, liite II taulukko 6).

4.1.4 PED-vaarallisuusluokka III

Siirryttäessä luokkaan III määritetään EU-tyyppitarkastus, joka erottelee painelaitteen suunnittelun ja valmistuksen. Tässä luokassa on viisi erilaista moduulien yhdistelmää, jotka muodostavat mahdolliset vaatimustenmukaisuuden arviointimenetelmät. Nämä yhdistelmät löytyvät taulukosta 11.

Arviointimenettelyn osa, *MODUULI B: EU-TYYPPITARKASTUS*, on jaettu kahteen tyyppiin, tuotanto- ja suunnittelutyyppiin. EU-tyyppitarkastus on toimenpide, jossa valmistaja lähettää ilmoitetulle laitokselle laaditut tekniset asiakirjat ja aiottua tuotantoa

edustavat näytteet, joiden perusteella laitos tarkastaa asiakirjat ja niitä tukevat aineistot sekä arvioi painelaitteen suunnittelun ja valmistusmenetelmien asianmukaisuutta. Ilmoitetun laitoksen on kiinnitettävä erityistä huomiota käytettyihin materiaaleihin, pysyvien liitoksien laatuun sekä liitoksia tekevien henkilöiden pätevyyden varmentamiseen. Jos valmistaja täyttää painelaitedirektiivin vaatimukset, on ilmoitetun laitoksen annettava EU-tyyppitodistus tälle. Todistus on voimassa 10 vuoden ajan. Tuotantotyyppin ja suunnittelutyyppin ero on, että suunnittelutyyppissä EU-tyyppitarkastus teetetään ainoastaan painelaitteen suunnittelulle ja täten tuotantoa edustavat näytteet eivät ole tarpeellisia. (2014/68/EU, liite III kohta 3)

Yhdistelmissä esiintyvät moduulit, *MODUULI D: TUOTANTOPROSESSIN LAADUNVARMISTUKSEEN PERUSTUVA TYYPINMUKAISUUS* ja *MODUULI E: PAINELAITTEEN LAADUNVARMISTUKSEEN PERUSTUVA TYYPINMUKAISUUS*, ovat samankaltaisia kuin PED-II luokan moduulit *DI* ja *EI* sillä erolla, että PED-III luokassa arvioidaan täyttävätkö laatujärjestelmät tiukempia EU-tyyppivaatimuksia. Järjestelmien auditointi on PED-III luokassa erityisen tarkkaa. (2014/68/EU, liite III kohdat 5 ja 7)

Arviointimenettelyn osassa, *MODUULI F: PAINELAITTEEN TARKASTUKSEEN PERUSTUVA TYYPINMUKAISUUS*, ilmoitettu laitos tarkastaa jokaisen painelaitteen erikseen. Tällöin ilmoitettu laitos hoitaa asiakirjojen tarkastuksen, lopputarkastuksen ja tarkastaa tarvittaessa varolaitteet. (2014/68EU, liite III kohta 9)

Samantapaisesti kuin PED-II luokan moduulissa *A2*, arviointimenettelyn osa, *MODUULI C2: SISÄISEEN TUOTANNONVALVONTAAN PERUSTUVA TYYPINMUKAISUUS JA SATUNNAISIN VÄLIAJOIN SUORITETTAVAT VALVOTUT PAINELAITETARKASTUKSET*, velvoittaa ilmoitetun laitoksen tekemään satunnaisia tuotetarkastuksia määrittäminään satunnaisina ajankohtina painelaitteen sisäisen tuotevalvonnan toiminnan takaamiseksi. Tärkeimpänä erona moduuliin *A2* on valvonnan keskittyminen tiukempiin EU-tyyppivaatimuksiin. (2014/68/EU, liite III kohta 4)

Arviointimenettelyt koostuvat näiden moduulien yhdistelmistä. Ensimmäisessä yhdistelmässä valmistaja lähettää painelaitetuotteen suunnittelun ilmoitetulle laitokselle tarkastettavaksi moduulin *B* (*suunnittelutyyppi*) mukaisesti ja hakee sille EU-tyyppihyväksyntää. Lisäksi valmistaja hakee hyväksyntää tämän laatujärjestelmälle moduulin *D* mukaisesti. Toinen vaihtoehto on lähettää suunnitteludokumentit

tarkastettavaksi kuten edellisessä menettelyssä, mutta laatujärjestelmän varmistuksen sijaan valmistaja ulkoistaa moduulin *F* mukaisesti lopputarkastuksen ilmoitetulle laitokselle.

Valmistaja voi myös hakea EU-tyyppihyväksyntää moduulin *B* (*tuotantotyyppi*) mukaisesti, jolloin valmistaja lähettää suunnittelutietojen lisäksi ilmoitetulle laitokselle tuotantoa edustavia näytteitä. Tämän lisäksi valmistaja sitoutuu moduulin *E* mukaisesti itse tarkastamaan jokaisen painelaitteen noudattaen laatujärjestelmää, jonka se on hyväksyttänyt ilmoitetulla laitoksella. Valmistaja voi myös EU-tyyppihyväksynnän hakemisen lisäksi sitoutua moduulin *C2* mukaisiin satunnaisiin ilmoitetun laitoksen tarkastuksiin.

Luokan III viimeinen arviointimenettelymahdollisuus, *MODUULI H: TÄYDELLISEEN LAADUNVARMISTUKSEEN PERUSTUVA VAATIMUSTENMUKAISUUS*, on menettely, jossa valmistaja moduulin *D* tapaisesti hyväksyttää laadunhallintajärjestelmänsä ilmoitetulla laitoksella tekemättä EU-tyyppihakemusta. Moduulin *H* tapauksessa vaatimukset ovat huomattavasti tiukemmat ja valvonta tarkempaa. (2014/68/EU, liite III kohta 11)

Käytännössä teollisuusputkiasennuksessa PED-III luokan putkiston tarkastusosuus on aina 100 %. Yleensä tätä putkistoluokkaa on kuitenkin niin vähän, että se ei aiheuta suuria ongelmia. PED-II ja -III luokkien putkiston koeponnistamisen erikoisjärjestelyihin palataan kappaleessa 5 *Ruuviliitokset ja painekoe*.

Tutkitaan vaarallisten höyryjen, sumujen ja kaasujen poistolinjaa, eli puhekielessä 'hönkälinjaa'. Tämän putkikoko on DN600 ja suunnittelupaine 1 bar. Koska linja kuuluu sisältöryhmään 1, voidaan edellisen kohdan kuvasta 5 todeta linjan kuuluvan putkistolle korkeimpaan vaarallisuusluokkaan III.

4.1.5 PED-vaarallisuusluokka IV

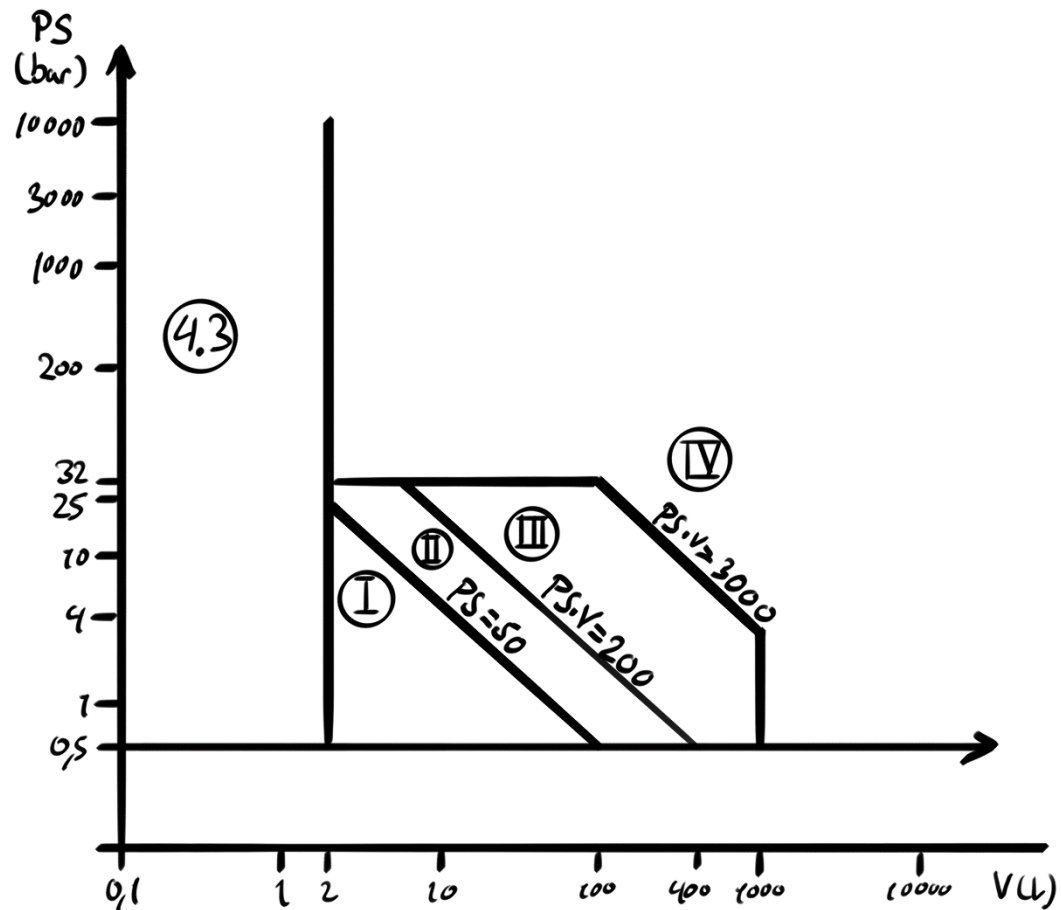
Luokan IV arviointimenettelyt rakentuvat jälleen erilaisten moduulien yhdistelmistä. Ensimmäinen menettely muodostuu siten, että valmistaja hakee tuotantotyyppin EU-tyyppihyväksyntää ja moduulin *D* mukaisesti hyväksyttää ja ylläpitää laatujärjestelmänä ilmoitetulla laitoksella. Toinen vaihtoehto on yhdistelmä, jossa tyyppihyväksynnän

lisäksi valmistaja ulkoistaa painelaitteiden tarkastuksen ilmoitetulle laitokselle moduulin F mukaisesti.

Luokan IV painelaitteet ovat usein ainutlaatuisia valmisteita, jolloin ei ole hyödyllistä hakea tyyppihyväksyntää tai perustaa minkäänlaista kattavaa laatujärjestelmää. Tällöin voitaisiin hyödyntää menettelyä, *MODUULI G: YKSIKKÖKOHTAISEEN TARKASTUKSEEN PERUSTUVA VAATIMUSTENMUKAISUUS*, jossa yksittäisen painelaitteen asiakirjat tarkistutetaan ilmoitetun laitoksen toimesta, joka myös tarkastaa tuotetun laitteen. (2014/68/EU, liite III kohta 10)

Viimeisenä PED-III luokan moduulin *H* tapainen arviointimenettely, *MODUULI HI: TÄYDELLISEEN LAADUNVARMISTUKSEEN JA SUUNNITTELUN TARKASTUKSEEN PERUSTUVA VAATIMUSTENMUKAISUUS*, jossa valmistaja hyväksyttää laadunhallintajärjestelmänsä ilmoitetulla laitoksella. Moduulissa *HI* valmistaja on kuitenkin velvoitettu myös tarkastuttamaan suunnittelun asianmukaisuus tarkemmin hakemalla EU-suunnitelmatarkastustodistusta. (2014/68/EU, liite III kohta 12)

Painelaitedirektiivin mukaisesti putkisto ei voi kuulua vaarallisuusluokkaan IV, täten käsitellään esimerkkinä tässä kohdassa höyrykattilaa. Kattilan suunnittelupaine on 100 bar, sen tilavuus on 500 litraa ja se tuottaa vesihöyryä, jonka lämpötila on 450 °C. Tarkastellaan kuvaa 6, josta voidaan todeta, että kattila kuuluu vaarallisuusluokkaan IV.



Kuva 6. Direktiivin 2014/68/EU artiklan 4 kohdan 1 alakohdan b mukainen luokittelukuvaaja (mukaillen 2014/68/EU, liite II taulukko 5).

4.2 Ulkomaiset standardoinnit

Kansainvälisesti merkittävä The American Society of Mechanical Engineersin (ASME) julkaisema *Boiler and Pressure Vessel Code* (BPVC) on käytetty ja monien eurooppalaisten kansallisten standardien perusta, joiden pohjalta painelaitedirektiivi on muodostunut. Vuonna 1898 perustettu ASTM, American Society for Testing and Materials, on ollut edelläkävijä materiaalien standardoinnissa ja erityisesti putkiosissa tätä hyödynnetään edelleen.

Toisen maailmansodan jälkeen Euroopan teollisuuden tuhoutumisen seurauksena oli tarve kehittää keveämpiä ja siten halvempia laitekokonaisuuksia myös painelaitteista. Tähän asti hallitseva Yhdysvaltalainen ASME standardijärjestelmä oli entisaikojen puutteellisen metallurgian takia suunniteltu tuottamaan jokseenkin ylimitoitettuja painelaitteita. Täten Euroopassa alettiin useiden kansallisten standardien kautta

muodostamaan materiaaliteknisesti kehittyneempiä standardijärjestelmiä. Näistä hyvä esimerkki on Brittiläinen *BS 5500* joka oli Yhdistyneissä kuningaskunnissa käytössä aina painelaitedirektiivin vahvistamiseen vuonna 2002 asti. *BS 5500* on edelleen käytössä ympäri maailmaa ja julkaistaan nykyään nimellä *PD 5500*.

Näistä kansallisista standardeista on kehittynyt eurooppalainen painelaitedirektiivi ja sen viittaamat standardit, erityisesti *EN 13445*. ASME on jatkanut standardiensa kehittämistä ja nykyisin erot eurooppalaiseen standardointiin ovat vähemmän ilmeisiä. Kuitenkin merkittävimmät erot verratessa ASME BPVC:tä *EN 13445*:seen ovat, että eurooppalaiset standardit sallivat yleensä suurempia jännityksiä sekä pienempiä turvakertoimia. Yhdysvaltalaiset standardit eivät taas vaadi yhtä laajaa testausta painelaitteille.

ASTM:n julkaisemien standardien mukaisia putkiosia käytetään yleisesti korvaamaan euronormien mukaisia niiden paremman saatavuuden takia. Esimerkiksi *EN 10253-4* mukaista (60,3x2 – 33,7x2) T-kappaletta ei ole saatavilla yleensä kuin tilaustuotteena, joten usein käytetään verrattavaa ASTM standardin mukaista tuotetta A 403, 2”/1” 10S, jonka mitat millimetreissä ovat: (60,3x2,77 – 33,4x2,77).

Muita kansainvälisesti käytettyjä standardeja ovat esimerkiksi japanilaisen JSA:n julkaisema *JIS B 8265* ja liittyvät standardit sekä Australian ja Uuden-Seelannin *AS/NZS 1200* ja liittyvät standardit. Venäläiset ja kiinalaiset kansalliset standardit ovat myös yleisesti käytettyjä Aasiassa.

5 LAIPPALIITOKSET JA PAINEKOE

Usein painelaite tai sen osa on irrotettava syystä tai toisesta, jolloin kiinteä liitos, kuten hitsisauma, ei ole mielekäs. Usein avattavissa liitoksissa voidaan hyödyntää perinteisen laippaliitoksen sijaan useita innovatiivisia pikalukitusjärjestelmiä. Teollisuudessa suurten paine-erojen ja vaarallisten virtaavien aineiden vuoksi pikalukitteiset liitokset eivät usein ole käytännöllisiä, vaikka ne nopeuttaisivat liitoskohdan avaamista ja sulkemista huomattavasti. Pikalukitteisia liitoksia käytetään kuitenkin laitoksen käyttölinjoissa, kuten palovesi-, raakavesi- ja paineilmalinjoissa.

5.1 Laippaliitokset

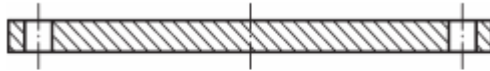
Laippaliitos on monipuolinen ja käytetyin avattava liitos painelaitteissa. Liitos toteutetaan kahden pinnan väliin jäävän tiivisteen avulla, joista vähintään toisen pinnan täytyy olla kiinnitetty kiinteästi painelaitteeseen. Nämä tiivistepinnat kiinnitetään toisiinsa ruuvien avulla. Laippa- ja tiivistetyyppejä on lukusia erilaisia riippuen standardista, paineluokasta, nimellismitasta, materiaalista ja käyttötarkoituksesta. Tässä työssä keskitytään ainoastaan eurooppalaisten standardien mukaisiin yleisimpiin painelaitteille tarkoitettuihin laippa- ja tiivistetyyppeihin. Tämä rajaa laipat ainoastaan pyöreisiin ja paineluokitettuihin laippoihin.

5.1.1 Laippatyypit

Yleisimmät laippatyypit painelaitteissa ovat umpi-, kaulus-, irta-, kierre- ja levylaippa. Näistä kierrelaippaa käytetään harvoin teollisuusputkistossa. Laippatyyppejä on saatavilla eri paineluokissa, joita esitetään Euroopassa PN numerolla. PN on tunnus, joka ilmoittaa laipan mekaanisten ominaisuuksien ja mittojen yhteensopivuutta. Harhaanjohtavasti puhekielessä esimerkiksi PN40 on '40 bar laippa', vaikka asianmukainen standardi selvästi toteaa, että: *"Kirjaimia PN seuraava luku ei edusta mitattavaa arvoa eikä sitä pitäisi käyttää mitoituslaitteisiin, ellei asiankuuluvassa standardissa näin määritetä."* (SFS-EN 1092-1, kohta 3.2)

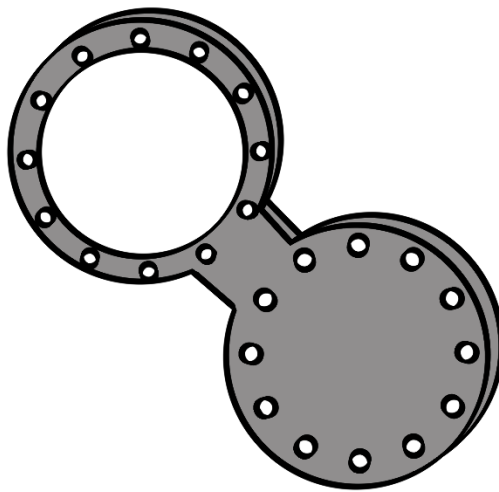
Umpilaippa on eheä levy, jossa on tasajaolla jakoympyrällä ruuvireikiä ja tiivistepinta. Kuvassa 7 esitetään yksinkertainen umpilaippa. Tällaista laippaa kutsutaan puhekielessä sokeaksi. Laipalla voidaan sulkea putkenpäitä ja luokkuja tilapäisesti tai pysyvästi.

Umpilaippa voi olla myös 'näkevä', jolloin laipasta on poistettu keskiö, tällöin ainoastaan tiivistepinta jää laippojen väliin. Tällaisia laippoja käytetään teollisuudessa, jos putkisto tai laite täytyy eristää muista laitteista määräajoin, esimerkiksi seisokin ajaksi. Sokean ja näkevän umpilaipan yhdistelmää kutsutaan kääntösokeaksi ja sen hahmotelma esitetään kuvassa 8. Umpilaippa harvoin vaurioituu itsessään, mutta niiden tiivistepinnat ovat yleinen vuotokohta putkistossa. Umpilaipoissa on tärkeää kiristää ruuvit oikealla menetelmällä. Lisäksi tiivistetyypistä riippuen laipat voidaan joutua jälkikiristämään.



**g) Tyypin 05
Umpilaippa**

Kuva 7. Umpilaippa, yksinkertaistettu kaaviomainen kuva (SFS-EN 1092-1, kuva 1).



Kuva 8. Kääntösokean hahmotelma.

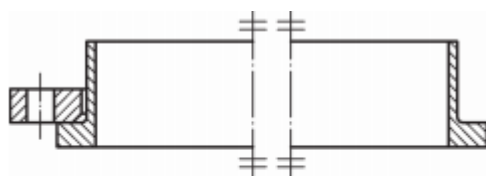
Kauluslaippa hitsataan kiinni päittäisen putkiliitoksen tavoin, jolloin saadaan erinomainen tiivistepinta liitettyä painelaitteeseen. Tällainen laippaliitos on erittäin yleinen teollisuusputkistossa. Kuvassa 9 esitetään yksinkertaistettu kauluslaippa. Kauluslaipan liitos putkeen vaatii samanlaisen tarkastuksen kuin tavanomainen putkien hitsiliitos toisiinsa.



**h) Tyyppi 11
Kauluslaippa**

Kuva 9. Kauluslaippa, yksinkertaistettu kaaviomainen kuva (SFS-EN 1092-1, kuva 1).

Irtolaippa on erityisen kätevä asennuksen kannalta, koska tällöin kaulusta hitsatessa putkeen ei tarvitse huomioida sen asentoa. Sillä irtolaippa ei ole kiinnitetty putkeen lainkaan. Irtolaippa vastaa kaulukseen ja pysyy paikallaan ruuviliitoksen ja laipan geometrian avulla. Kaulus voi olla hitsattava kuten kuvassa 10 esitetään tai muovattu putkeen, esimerkiksi puristamalla. Hitsatun kauluksen liitos putkeen täytyy tarkastaa tavanomaisesti.



**c) Tyyppi 02
Irtolaippa ja hitsattava kaulus
(ks. tyyppi 35)**

Kuva 10. Irtolaippalaippa ja hitsattava kaulus, yksinkertaistettu kaaviomainen kuva (SFS-EN 1092-1, kuva 1).

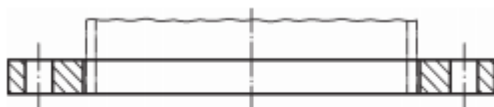
Kierrelaipassa on lieriömäinen tai kartiomainen sisäkierre, johon voidaan liittyä vastaavalla ulkokierteisellä putkella. Tällaisia laippaliitoksia on erittäin vähän teollisuusputkistossa putkikokojen ja vuotoriskien ollessa suuria. Kierreosat ovat tietyissä modulaarisissa ratkaisuissa hyödyllisiä, mutta yleensä niistä on enemmän haittaa kuin hyötyä asennuksessa. Kuvassa 11 esitetään yksinkertainen kaulustettu kierrelaippa.



j) Tyyppi 13
Kaulustettu kierrelaippa

Kuva 11. Kaulustettu kiertoalaippa, yksinkertaistettu kaaviomainen kuva (SFS-EN 1092-1, kuva 1).

Levylaippa on laippatyyppeä, jota käytetään yksinomaan istutusten tekemiseen. Istutus tehdään siten, että laitteeseen, yleensä säiliöön tai putkeen, tehdään reikä ja lyhyt putki eli tumpi hitsataan reikään. Levylaippa sitten hitsataan tähän putkeen. Hitsaus tehdään yleensä laipan sisä- ja ulkopuolelta, jolloin saadaan varmemmin tiivis liitos. Kuvassa 12 esitetään yksinkertainen levylaippa. Istutus tarkistetaan yleisesti jollakin pintatarkastusmenetelmällä kuten tunkeumanesteellä.



a) Tyyppi 01
Levylaippa

Kuva 12. Levylaippa, yksinkertaistettu kaaviomainen kuva (SFS-EN 1092-1, kuva 1).

5.1.2 Tiivistetyypit

Laippojen väliin täytyy asentaa tiiviste, jonka mitat ja paksuus riippuu käytetyn laipan muodosta. Tasotiivisteitä tai laippatiivisteitä on kuitenkin useita tyyppejä riippuen käyttöolosuhteista. Tärkeimmät tiivisteiden valintaan vaikuttavat muuttujat ovat painelaitteen sisältö, paine ja lämpötila. Seuraavaksi käydään läpi merkittävimmät päätyypit, jotka ovat PTFE-, kuitu-, grafiitti- ja metallitiivisteet.

PTFE-tiivisteet eli teflontiivisteet ovat erityisesti kehitettyjä painelaitteille, joiden sisältö on kemiallisesti kuluttavaa, kuten vahvasti happamat tai emäksiset sisällöt. Tästä syystä niitä kutsutaan puhekielessä 'kemiallisiksi' tiivisteiksi. Teflontiivisteet ovat kohtuullisen

hintaisia ja ne eivät tuhoudu laippojen avaamisen jälkeen. PTFE-tiivisteet sietävät jokseenkin korkeita lämpötiloja noin 200 °C asti

Kuitutiivisteet ovat yleiskäyttöisiä lasikuitu-, hiilikuitu-, tai aramidkuituvahvistettuja tiivisteitä. Ne toimivat hyvin käyttökohteissa, joissa ei ole kemiallista kulutusta, korkeaa lämpötilaa tai erityisen suurta painetta. Tiivisteiden käsittely ei kemiallisten tiivisteiden tavoin vaadi yleensä mitään erityistoimenpiteitä. Kuitutiivisteet ovat yleisesti halvempia kuin vastaavat teflontiivisteet.

Grafiitti- tai micapohjaiset tiivisteet ovat lämmönkestoiltaan erinomaiset. Niiden käyttölämpötila-alue on noin -200–500 °C. Niiden kemialliset ominaisuudet ovat myös hyvät. Grafiittitiivisteet rakentuvat teräspohjasta, johon kasvatetaan pehmeä grafiittikerros. Tiivisteet toimitetaan yleensä liekkirenkaalla, joka on ohut teräspelti mikä suojaa tiivisteiden sisäpintaa kuljetettavalta aineelta. Tällaiset tiivisteet ovat kalliita ja niitä ei voida kiristää uudelleen laippojen avaamisen jälkeen pehmeän grafiitin vuoksi.

Kaikista kalleimmat yleisesti käytetyt tiivisteet ovat metalli- tai semi-metallitiivisteet, jotka yleensä koostuvat spiraalisesta- tai kampaprofiilisesta metalliluiskasta, joka on vaipoitettu. Metallitiivisteet ovat tarkoitettu korkeapaine käyttökohteisiin. Metallitiivisteitä hankkiessa täytyy huomioida laippojen materiaalin kovuus, jotta tiiviste ei vahingoita niiden tiivistyspintaa. Nämä tiivisteet grafiittisten tavoin eivät kestä uudelleenkäyttöä. Tiivisteiden ja laippojen kokonaisuuksien toiminta riippuu tiivistepintojen ja tiivisteiden eheydestä. Nämä testataan painelaitteen lopputarkastuksessa tehtävän painekokeen avulla.

5.2 Painekeo

Painelaitedirektiivissä säädetään, että painelaitteiden lopputarkastukseen on kuuluttava painekoe, eli koeponnistus. Tämä yleensä toteutetaan nestepainekokeena, mutta jos painelaitetta ei voida täyttää vedellä, niin koe voidaan tehdä esimerkiksi tyypikaasulla. Koeponnistus on yksinkertainen ja tehokas tapa tarkastaa erityisesti suuria painelaitekokonaisuuksia, kuten teollisuusputkistoa. (2014/68/EU, liite I kohta 3.2.1)

Painekoe on erityinen ainetta rikkomaton testausmenetelmä, jonka valmistaja pystyy itse suorittamaan. Kuitenkin PED luokissa II, III ja IV tarvitaan kolmas osapuoli valvomaan

ja hyväksymään tarkastus. Erityisesti teollisuusputkistossa painekokeen itse suorittaminen on tehokasta, koska valmistaja voi määritellä koeponnistettavat laitteet valmistus- tai asennusjärjestyksen mukaan.

Vedellä koeponnistamiseen tarvitaan ainoastaan painemittari ja vesilähde, joka kykenee tuottamaan koeponnistuspaineen. Usein teollisuuslaitteita koeponnistaessa ne ovat laitoksessa sisällä asennettuina, jolloin voidaan hyödyntää tehtaan käyttö- tai palovesiliitäntöjä, jotka ovat käytössä huoltoseisokkienkin aikana. Jos paine on suurempi kuin esimerkiksi palovesilinjojen 6–8 bar, täytyy syötön ja liitännän välille asentaa kompressori. Edullinen vaihtoehto tähän on tavanomainen painepesuri, jolla päästään jo 100–200 bar paineisiin. Painepesuria käytettäessä on tärkeää täyttää painelaite mahdollisimman täyteen ennen painepesurin kytkemistä, sillä pesurien virtausmäärät ovat pieniä 5–10 l/min. Vesimäärältä suurin koeponnistus, jonka tekijä on itse suorittanut, oli neljä 400 m³ kattilaa putkineen. Täyttö kesti tällöin useita päiviä, mutta lopullinen paineen nosto koepaineeseen 27 bar tapahtui painepesurilla muutamassa tunnissa. Erittäin hyödyllinen lisä koeponnistajan laitteistoon on venttiileillä varustettu jakotukki, jolla voidaan vaihtaa syöttö painepesurin ja tuloveden välillä. Lisäksi painemittari on kätevä kiinnittää tähän tukkiin, kuin myös jättää yksi tyhjä liitos tarkastajan mittarille.

Putkistoa koeponnistaessa kannattaa valita mahdollisimman suuria kokonaisuuksia, sillä tällöin voidaan painekokeiden määrää vähentää huomattavasti. Painelaitteita ponnistaessa nesteellä täytyy mittari kiinnittää korkeimpaan kohtaan, jolloin tulos on lähimpänä todellisuutta. Tämä ei kuitenkaan kenttäolosuhteissa ole usein mahdollista ja joudutaan kiinnittämään mittari jonnekin muualle putkistossa. Kaikki painelaitteen osat täytyy olla vähintään koepaineessa, tällöin erityisesti suurissa ja monessa kerroksessa olevissa painelaitekokonaisuuksissa pitää huomioida korkeuserosta aiheutuva hydrostaattinen paine. Tähän yksinkertainen nyrkkisääntö on 1 bar per 10 m korkeuseroa. Tarkka laskentakaava esitetään yhtälössä 2 alla:

$$p = \rho \cdot g \cdot h \quad (2)$$

missä p on hydrostaattinen paine [Pa],
 ρ on fluidin tiheys [kg/m³],
 g on putoamiskiihtyvyys [m/s²] ja
 h on korkeusero [m].

Tarkastellaan tilannetta, jossa koepaine on 30 bar ja mittari on sijoitettu 8 m alemmaksi. Nyrkkisäännön mukaan koepaine on saavutettu vasta kun mittarin lukema on 30,8 bar. Veden tiheys muuttuu lämpötilan mukana ja painelaitteen geometria voi vaikuttaa paine-eroon, mutta nyrkkisäännön tarkkuus riittää useimmissa tapauksissa. Varsinkin koska kylmä vesijohtovesi lämmitessään huoneenlämpöön nostaa painetta. Hydrostaattisen paineen, sekä lämpötilamuutosten aiheuttama paine-ero ei ole yleensä niin suuri, että testipaineen ylittäminen vaurioittaisi eheää painelaitetta. Tämän vaurioitumisen riskin takia ylipainetta tulisi kuitenkin välttää.

Täyttöpaikka koeponnistukselle valitaan siten, että veden syöttö voidaan maksimoida. Kannattaa suosia palovesiliitainta sen suuren virtausmäärän ja syöttöpaineen takia. Erityisesti suuria kokonaisuuksia täyttäessä täytyy varmistua, että vesi virtaa painelaitteen kaikkiin osiin. Monimutkaisessa laitosputkistossa on usein vaikea varmistua kunnollisesta täyttymisestä. Tämän helpottamiseksi kannattaa ennen putkiston ponnistamista tarkastaa linja kauttaaltaan ja huomioida koeponnistukselle olennaisten komponenttien asemat.

Painelaitteissa on usein koeponnistusta vaikeuttavia osia, kuten takaiskuja tai herkkiä instrumentteja, joita ei voi koeponnistaa. Putkistoa tarkastaessa täytyy myös selvittää paineistetun alueen päätepiisteet. Joissakin tapauksissa voidaan ponnistaa venttiilejä vasten, mutta useimmiten joudutaan näihin kohtiin asentamaan umpilaippa, jota vasten ponnistetaan. Takaiskut voidaan kääntää tai poistaa ja korvata niin sanotulla 'mannekiinilla', joka on laipoitettu pala putkea. Herkät instrumentit on syytä myös korvata mannekiinilla koeponnistuksen ajaksi. Umpilaippojen ja näiden mannekiinien osalta on tärkeää, että ne kestävät koeponnistuspaineen, vaikka niitä ei tarkistettaisikaan. Tällaisissa paikoissa vuodot ovat usein hyväksyttäviä painekokeen aikana.

Täytön aikana painelaitteeseen muodostuu ilmataskuja, jotka täytyy poistaa, eli painelaite täytyy ilmata. Ilma karkaa ylöspäin, joten ilmaus täytyisi tehdä laitteen korkeimmasta kohdasta. Putkistoa joudutaan usein ilmaamaan useasta kohtaa. Ilmaus voidaan tehdä mistä tahansa liitoksesta, mutta erityisesti putkistossa olisi hyvä käyttää tähän tarkoitukseen suunniteltuja ilmausnippoja. Harmillisen usein nämä kuitenkin jäävät putkisuunnittelijalta huomioimatta ja niitä joudutaan lisäämään asennuksien yhteydessä. Tällaisen nipan hitsaaminen ei ole vaikea operaatio, mutta koska se jää pysyväksi osaksi tuotetta, täytyy nipan istutus usein tarkastaa erikseen. Tähän riittää useimmiten

tunkeumanestetarkastus. Ilmausprosessi on yksinkertainen, laitteen täyttyessä ilmaukset ovat auki ja ilma karkaa niistä. Kun vesi alkaa suihkuamaan ilmauksesta, on hyvä antaa sen hetken suihkuta ja tuoda mahdollisimman paljon ilmaa mukanaan. Tämä usein kastelee ympäristön täysin. Sitten ilmaus suljetaan ja siirrytään seuraavalle ilmaukselle, tai aloitetaan paineen nostaminen.

Paineen noustessa joudutaan usein käydä kiristelemässä laippoja ja mahdollisesti korjaamassa vuotoja, siksi olisikin tehokkainta olosuhteiden salliessa suorittaa paineen nosto jo hyvissä ajoin, ennen itse painekokeen suoritusta ja tarkastajien saapumista. Painekokeen kesto on yleisesti 30 min, mutta voi olla pidempikin, tällaiset asiat sovitaan asiakkaan kanssa. Useimmiten laitteet ovat kuitenkin koepaineessa kauemmin siksi, että aikataulullisesti tarkastus ja itse koe voi tapahtua eri aikaan kuin täyttö ja paineen nostaminen.

Koeponnistettavan painelaitteen tilavuuden, koepaineen tai muun tekijän takia voidaan joutua suorittamaan erilaisia turvallisuustoimenpiteitä. Aikaisemmin mainituissa kattiloiden koeponnistuksessa jouduttiin eristämään koko osasto täytön ja koeponnistuksen ajaksi. Pelkona oli suuren vesimassan takia kattiloiden jalkojen sortuminen. Kun koeponnistus täytyy tehdä erittäin suurella paineella, putkikoosta riippuen yli 50 bar, voidaan joutua asentamaan koeponnistuksen ajaksi suojakilpiä laippojen ympärille tai eristämään alue. Näissä suuremmissa yli 50 bar paineissa vesisuihku on vahingoittava ihmisille. Lisäksi jos koeponnistus tehdään muulla väliaineella kuin vedellä, voidaan joutua jälleen tyhjentämään alue ihmisistä ponnistuksen ajaksi. Typellä ponnistaessa yleensä joudutaan eristämään alue sen aiheuttaman tukehtumisvaaran vuoksi.

Koeponnistuspaine on paine, joka vastaa suurinta kuormitusta, joka laitteeseen voi kohdistua. Tämän tiedon puuttuessa voidaan käyttää suurimman sallitun käyttöpaineen ja suurimman sallitun lämpötilan aiheuttama paine kerrottuna luvulla 1,24 tai suurin sallittu käyttöpaine kerrottuna luvulla 1,43. Näistä täytyy valita korkeampi. Koepaine on merkittynä painelaitteen suunnitteludokumentteihin. (2014/68/EU, liite I kohta 7.4)

Tarkastus voidaan aloittaa, kun koepaine on saavutettu, vedensyöttö suljettu ja korkeamman PED-luokan tapauksissa kolmannen osapuolen tarkastaja on paikalla. Tarkastajan kanssa tai ilman tulee koko painelaite käydä tarkasti läpi hyvässä valaistuksessa tai taskulampun kanssa. Tarkastuskierros on järkevä aloittaa paineen

mittauskohdasta, jolloin voidaan kirjoittaa ylös alkulukema painemittarilta. Tarkastuksen aikana huomattuja vuotoja voidaan korjata välittömästi, kuten laippojen kiristäminen tai venttiilien sulkeminen. Vuotoja, joita ei pystytä korjaamaan painekokeen aikana, kuten rikkiäinen venttiili tai laitteen vuoto, voidaan raportoida ja merkitä ylös korjattavaksi myöhemmin. Jos vuoto voidaan paikallistaa tällä tavoin ei ole yleisesti tarvetta ponnistaa uudelleen, vaan korjaustoimenpiteiden jälkeen, esimerkiksi hitsisauma voidaan tarkastaa jollakin NDT-menetelmällä. Painekokeessa havaittavat viat ovat yleensä pieniä koska täyttövaihe ja paineen nosto on tapahtunut jo aikaisemmin ja näitä vaihteita ei saa päätökseen, ellei painelaite ole lähes täysin eheä. Tarkastuskierroksen jälkeen palataan paineen mittauspaikalle ja tarkastellaan lopullista paine-eroa. Pienissä laitteissa tavanomaisessa lämpötilassa paine-eron ei pitäisi olla merkittävä. Kuitenkin painelaitteiden tilavuuden ja veden lämpötilaeron ympäristöön kasvaessa paine-ero voi olla huomattava, vaikka laitteisto ei olisi viallinen. Näiden paine-erojen syyt on selvitettävä ja jos niitä ei pystytä perustella, on syytä suorittaa tarkastuskierros uudelleen. Yleensä kuitenkin syyt ovat selviä, kuten havaittu vuotava venttiili tai veden lämpenemisestä aiheutuva paineen kasvu. Tarkastuksen päätteeksi lopullinen paine kirjataan ylös.

Koeponnistuksen jälkeen on aloitettava väliaineen purkaminen painelaitteesta. Vedellä tai muulla kokoonpuristumattomalla aineella ponnistaessa paine laskee erittäin nopeasti. Paine kannattaa laskea korkeimmasta ilmauksesta, jolloin purkautuvan veden määrä on pienin mahdollinen. Paineen laskettua kokonaan on hyvä avata kaikki ilmaukset ja aloittaa veden purkaminen paikasta mahdollisimman matalalla, johon vesi kerääntyy. Ilmausten aukaisu on erityisen tärkeää, koska laitteeseen muodostuva alipaine voi vaurioittaa sitä. Tarkastetun laitteen tilavuuden mukaan kannattaa valita kohta, josta purku voidaan toteuttaa mahdollisimman suurella virtausnopeudella, kuitenkin huomioiden viemäröinnin riittävyys. Teollisuuskohteissa on usein mahdollista hyödyntää olemassa olevaa putkistoa purkamiseen, joka vie veden suoraan viemäriin. Esimerkiksi lauhdeputkisto päättyy tavanomaiseen viemäriin. Kaasulla ponnistetun painelaitteen purkamisessa, riippuen kaasusta, voidaan joutua noudattamaan erityismääräyksiä. Inertiikaasu, kuten typpi voidaan päästää suoraan ulos painelaitteesta. Tällöin pitää kuitenkin huolehtia tilan riittävästä tuuletuksesta. Painelaite voidaan tarvittaessa puhdistaa välittömästi tarkastuksen jälkeen esimerkiksi paineilmalla. Painelaitteen käyttöönotossa kuitenkin laite puhalletaan tai huuhdellaan niin sanotuissa vesiajoissa. Painekokeesta tehdään muiden NDT-kokeiden tapaan tarkastuspöytäkirja. Pöytäkirjassa tulee käydä ilmi

vähintään koeponnistetut painelaitteet, koeponnistusväliaine, testipaine, kokeen kesto ja tarkastuksen tulokset.

6 TARKASTUSMENETELMÄN VALINTA

Kaikki työssä käsitellyt osa-alueet voidaan nyt tuoda yhteen ja suositella yleisimmille tapauksille painelaitteiden laadunvarmistuksen menetelmää. Huomattavaa on kuitenkin, että viimekädessä asianmukainen sovellutusstandardi määrää mitä menetelmää käytetään missäkin tilanteessa. Täten valitun menetelmän yhteensopivuus on aina tarkistettava.

Painelaitteet valmistetaan lähes aina teräksestä, kuitenkin tietyissä erikoistilanteissa voidaan joutua hyödyntämään muita materiaaleja. Esimerkiksi erittäin korkeissa lämpötiloissa voidaan joutua käyttämään nikkelisiä painelaitteita. Keskitytään teräksestä valmistettujen painelaitteiden tarkastusmenetelmiin. Näiden muiden materiaalien, kuten nikkelin, alumiinin, kuparin ja titaanin tarkastusmenetelmiä käydään suppeammin läpi. Vahvistetut muoviset painelaitteet ovat myös mahdollisia, mutta ne eivät kuulu tämän työn laajuuteen.

Kaikkia teräslaatuja ei voida tarkastaa samalla tavoin, siksi on aiheellista jakaa nämä laadut tarkastusmenetelmän mukaan. Painelaitteissa käytetään yleensä niukkahiilistä kattilaterästä, ruostumatonta terästä tai haponkestävää terästä. Tarkastusmenetelmän valinta riippuu siitä, onko materiaali voimakkaan ferromagneettista. Yleisesti käytetyistä teräslaaduista voidaan linjata, että kattilateräkset ja ruostumattomat teräkset ovat ns. ferriittisiä teräksiä. Haponkestävät teräslaadut luokitellaan taas austeniittisiksi teräksiksi.

Lähtökohtana tarkastusmenetelmän valinnalle toimii hitseille yleisesti hyväksytyt tarkastusmenetelmät. Nämä esitetään pintavirheille ja sisäisille virheille taulukoissa 12 ja 13 vastaavasti.

Taulukko 12. Kaikentyyppisten hitsien pintavirheiden yleisesti hyväksytyt tarkastusmenetelmät. Sulkeissa esitetyt menetelmät soveltuvat rajoituksin (mukaillen SFS-EN ISO 17635:2016, taulukko 2).

Materiaalit	Tarkastusmenetelmä
Ferrittinen teräs	VT VT ja MT VT ja PT VT ja (ET)
Austeniittinen teräs	VT
Alumiini ja nikkeli	VT ja PT
Kupari ja titaani	VT ja (ET)

Taulukko 13. Läpihitsattujen päittäis- ja T-liitosten sisäisten virheiden yleisesti hyväksytyt tarkastusmenetelmät. Sulkeissa esitetyt menetelmät soveltuvat rajoituksin (mukaillen SFS-EN ISO 17635:2016, taulukko 3).

Materiaali ja liitosmuoto	Hitsattavan perusaineen nimellispaksuus (mm)		
	<8	8–40	>40
Ferriittinen päittäisliitos	RT tai (UT)	RT tai UT	UT tai (RT)
Ferriittinen T-liitos	(UT) tai (RT)	UT tai (RT)	UT tai (RT)
Austeniittinen päittäisliitos	RT	RT tai (UT)	(RT) tai (UT)
Austeniittinen T-liitos	(UT) tai (RT)	(UT) tai (RT)	(UT) tai (RT)
Alumiini päittäisliitos	RT	RT tai UT	RT tai UT
Alumiini T-liitos	(UT) tai (RT)	UT tai (RT)	UT tai (RT)
Nikkeli- ja kupariseos päittäisliitos	RT	RT tai (UT)	(RT) tai (UT)
Nikkeli- ja kupariseos T-liitos	(UT) tai (RT)	(UT) tai (RT)	(UT) tai (RT)
Titaani päittäisliitos	RT	RT tai (UT)	-
Titaani T-liitos	(UT) tai (RT)	UT tai (RT)	-

Pintavirheiden tarkastukseen useimmiten riittää silmämääräinen tarkastelu, mutta jos on tarve käyttää tarkempaa menetelmää, tulisi suosia tunkeumanestetarkastusta. PT menetelmä on kustannustehokas, yksinkertainen ja nopea tarkastusmuoto. Magneettijauhe- ja pyörrevirtatutkimusta tulisi hyödyntää ainoastaan sellaisessa tapauksessa, jossa tunkeumanesteellä ei saada luotettavia tuloksia.

Hitsisaumojen sisäisten virheiden osalta taulukon 13 seuraaminen kattaa useimmat painelaitteiden käyttökohteet. Painelaitteiden hitsattavien liitosten nimellispaksuudet ovat kuitenkin harvoin niin suuria, että ultraäänitarkastuksella päästäisiin luotettaviin tuloksiin. Paksuseinämaisten painelaitteiden tarkastuksessa tulisi hyödyntää ultraäänitutkimusta radiografian sijasta sen lukuisten etujen johdosta. Pienen ainevahvuuden T-liitoshitsi on hankala tarkastaa radiografialla monimutkaisen geometrian takia, mutta ultraäänellä tulosten luotettavuudesta ei voida varmistua aineenvahvuuden ollessa liian pieni. Tällaisen T-liitoksen hitsausta tulisi valvoa ja sen juuri kuvata boroskooppikameran tai vastaavan laitteen avulla. T-liitoksen ollessa kriittinen painelaitteen eheydelle tulisi hitsin valmistus suunnitella siten, että kohde päästään radiografisesti tutkimaan.

7 YHTEENVETO

Painelaitteiden laadunvarmistukseen tarvittavien perustietojen esittäminen aloitettiin määrittämällä tarve varmistaa painelaitteiden eheys ja turvallisuus. Seuraavaksi käsiteltiin laatuongelmien yleisimmät aiheuttajat eli hitsausvirheet. Näiden virheiden sallittavien määrien ja mittojen ymmärtämiseksi tutkittiin hitsiluokittelua. Tällöin siirryttäessä tarkastelemaan rikkomattoman aineenkoetuksen mahdollisuuksia, lukija ymmärtää millaisia vikoja menetelmillä etsitään ja miten niiden hyväksyttävät rajat on määritetty.

Rikkomattoman aineenkoetuksen yleisimmät menetelmät esitettiin työssä toimintaperiaatteiden, hyötyjen ja rajoitusten kautta. Tämän jälkeen selvitettiin millaisia vaatimuksia painelaitteiden laadunvarmistukselle painelaitedirektiivi asettaa. Direktiivin luokittelun ja arviointimenettelyjen käsittelyn ohessa annettiin käytännön esimerkkejä laitteiden sijoittumisesta tähän lainsäädäntöön. Painelaitteiden laippaliitokset käsiteltiin yleisimpien laippa- ja tiivistetyyppien kautta. Painelaitteista rakentuvien kokonaisuuksien laadunvarmistamista avattiin käytännönläheisesti nestepainekokeen avulla. Lopuksi työssä esiteltiin pääpiirteisesti standardien näkemys tarkastusmenetelmän valinnasta ja painelaitteiden mahdolliset poikkeukset näihin yleisiin ohjeisiin.

LÄHDELUETTELO

ASM Handbook Committee, 2001. *ASM handbook: Volume 17, Nondestructive evaluation and quality control*. 9 painos. Ohio: ASM International.

Cartz, L., 1995. *Nondestructive Testing : Radiography, Ultrasonics, Liquid Penetrant, Magnetic Particle, Eddy Current*. Ohio: ASM International.

Euroopan parlamentti ja neuvosto, 2014. *Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2014/68/eu, painelaitteiden asettamista saataville markkinoilla koskevan jäsenvaltioiden lainsäädännön yhdenmukaistamisesta*. Helsinki: Euroopan unionin virallinen lehti.

Fenton, E.A., 1968. *Welding inspection: supersedes inspection handbook B1.1–45*. Miami: American Welding Society.

Kauppi, T., 2019. *Julkaisematon tutkimus, materiaali- ja konetekniikan tutkimusyksikkö. 465104A, Metallien lämpökäsittely ja hitsaus luentomateriaali*. Oulu: Oulun yliopisto.

Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry, 2018. *SFS-EN ISO 1092-1:2018 Laipat ja laippaliitokset. Pyöreät laipat putkille, venttiileille, yhteille ja varusteille, PN-mitoitetut. Osa 1: Teräslaipat*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry

Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry, 2014. *SFS-EN ISO 3452-1 Rikkomaton aineenkoetus. Tunkeumanestetarkastus. Osa 1: Yleisperiaatteet*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry

Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry, 2014. *SFS-EN ISO 5817 Hitsaus. Teräksen, nikkelin, titaanin ja niiden seosten sulahitsaus (paitsi sädehitsaus). Hitsiluokat*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry

Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry, 2017. *SFS-EN ISO 9934-1:2016 Rikkomaton aineenkoetus. Magneettijauhetarkastus. Osa 1: Yleisohjeet*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry

Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry, 2018. *SFS-EN ISO 10042:2018 Hitsaus. Alumiinin ja alumiiniseosten kaarihitsaus. Hitsiluokat*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry

Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry, 2014. *SFS-EN ISO 16810 Rikkomaton aineenkoetus. Ultraäänitarkastus. Yleisperiaatteet*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry

Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry, 2016. *SFS-EN ISO 17635:2016 Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Yleisohjeet metallisille materiaaleille*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry

Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry, 2013. *SFS-EN ISO 17636-1 Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Radiografinen kuvaus. Osa 1: Röntgen- ja gammakuvaus filmitekniikalla*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry

Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry, 2017. *SFS-EN ISO 17637:2016 Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Sulahitsausliitosten silmämääräinen tarkastus*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry

Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry, 2017. *SFS-EN ISO 17638:2016 Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Magneettijauhetarkastus*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry

Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry, 2016. *SFS-EN ISO 17643 Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Hitsien pyörrevirtatarkastus kompleksitasoanalyysillä*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry

Tiainen, T. & Leinonen, J., 1982. Konetekniset mittaukset (46115A): Materiaaliominaisuuksien mittaus (aineenkoetus). Oulu: Oulun yliopisto.

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes), 2020. *Painelaitedirektiivin 2014/68/EU (PED) soveltamisohjeet* [verkkodokumentti]. Helsinki: Tukes Saatavissa: <https://tukes.fi/documents/5470659/6372817/Painelaitedirektiivin+soveltamisohjeet/> [viitattu 13.1.2021].

Åström, T., 1990. *NDT-menetelmien kehitysnäkymät hitsausliitosten tarkastuksessa: Hitsaus 1990-luvulla*. Helsinki: Metalliteollisuuden kustannus.